Leibniz Universität Hannover

studienarbeit am ikg

Joachim Niemeyer und Jonathan Reusse

Untersuchung der Messgenauigkeit von Sportuhren mit Geschwindigkeits- und Entfernungsfunktionen

Betreuer: Dipl.-Ing Frank Thiemann
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Sester

ikg

Untersuchung der Genauigkeit von Sportuhren mit Geschwindigkeits- und Entfernungsfunktion

2007

Erklärung

Wir versichern, dass wir diese Studienarbeit selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet haben.

_____ _____

Joachim Niemeyer Jonathan Reusse

Inhalt

1. Einleitung 1

1.1 Motivation 1

1.2 Zielsetzung der Arbeit 1

1.3 Gliederung der Arbeit 2

2. Technische Grundlagen 3

2.1 GPS – Global Positioning System 3

2.1.1 Einleitung 3

2.1.2 Geschichtliche Entwicklung 3

2.1.3 Segmentierung des GPS-Systems 4

2.1.4 Messverfahren 6

2.1.5 Fehlereinflüsse 7

2.1.6 Genauigkeit 10

2.1.7 GPS-Empfänger, Funktionsweise & Auswertegang 14

2.2 Fahrradcomputer 16

2.2.1 Einleitung 16

2.2.2 Geschichtliche Entwicklung 16

2.2.3 Funktionsprinzip und Weiterentwicklungen 18

2.2.4 Fehlereinflüsse 20

2.3 Radar 23

2.3.1 Einleitung 23

2.3.2 Geschichtliche Entwicklung 23

2.3.3 Anwendungsgebiete 24

2.3.4 Funktionsprinzip 25

2.3.5 Frequenzbereiche 29

2.3.6 Fehlereinflüsse 29

2.4 Beschleunigungssensoren 31

2.4.1 Einleitung 31

2.4.2 Geschichtliche Entwicklung 31

2.4.3 Funktionsprinzip 32

2.4.4 Fehlereinflüsse 36

2.5 Barometrische Höhenmessung 37

2.5.1 Einleitung 37

2.5.2 Physikalische Grundlagen 37

2.5.3 Barometer 38
2.5.4 Genauigkeit 40
3. Allgemeine Grundlagen zu den Tests 41
3.1 Erläuterungen zum Begriff Genauigkeit 41
3.2 Genauigkeitsanforderungen an die Geräte 43
3.3 Beschreibung der Teststrecken 45
4. Beschreibung der Geräte....71
4.1 Garmin Edge 305 73
4.1.1 Gerätebeschreibung 73
4.1.2 Bedienung 75
4.1.3 Tragekomfort....76
4.1.4 Messprinzip GPS 77
4.1.5 Messprinzip Fahrradcomputer 104
4.1.6 Messprinzip barometrische Höhenmessung 113
4.1.7 Zusammenfassung....116
4.2 FRWD W600 117
4.2.1 Gerätebeschreibung 117
4.2.2 Bedienung 119
4.2.3 Tragekomfort....120
4.2.4 Messprinzip GPS 121
4.2.5 Messprinzip barometrische Höhenmessung 149
4.2.6 Zusammenfassung....151
4.3 Casio GPR 100....153
4.3.1 Gerätebeschreibung 153
4.3.2 Bedienung 154
4.3.3 Tragekomfort....155
4.3.4 Messprinzip GPS 156
4.3.5 Zusammenfassung....162
4.4 Garmin Forerunner 305....163
4.4.1 Gerätebeschreibung 163
4.4.2 Bedienung 165
4.4.3 Tragekomfort....166
4.4.4 Messprinzip GPS 167
4.4.5 Zusammenfassung....195

4.5 Ciclosport HAC 5 197
4.5.1 Gerätebeschreibung 197
4.5.2 Bedienung 199
4.5.3 Tragekomfort 200
4.5.4 Messprinzip Radar 201
4.5.5 Messprinzip Fahrradcomputer 229
4.5.6 Messprinzip barometrische Höhenmessung 236
4.5.7 Zusammenfassung 239
4.6 Polar S625X 241
4.6.1 Gerätebeschreibung 241
4.6.2 Bedienung 243
4.6.3 Tragekomfort 244
4.6.4 Messprinzip Beschleunigungssensor 245
4.6.5 Messprinzip Barometrische Höhenmessung 269
4.6.6 Zusammenfassung 272
4.7 Gerätevergleich 273
4.7.1 Vergleich 273
4.7.2 Empfehlungen 282
5. Zusammenfassung und Ausblick 283
5.1 Zusammenfassung 283
5.2 Ausblick 284
Literaturverzeichnis 285
Anhang 287

Farbliche Unterscheidung
der Autoren nach Kapiteln:

Joachim Niemeyer

Jonathan Reusse

1. Einleitung

1.1 Motivation

Heutzutage spielen Sportuhren zur Trainingssteuerung und –Dokumentation eine immer größer werdende Rolle. Während im Radsport seit Jahren Fahrradcomputer zum Einsatz kommen, steigt das Interesse an Entfernungs-, Geschwindigkeits- und Höhenmessungen in anderen Disziplinen stetig an. Gerade bei Sportarten wie Laufen oder Skifahren sind Planungs- und Analysemöglichkeiten gefragt. Seit kurzer Zeit sind auch Geräte erhältlich, die Alternativen zur Messung mit Rad bieten und damit diese Nachfrage decken sollen. Die eingesetzten Messverfahren basieren dabei meist auf GPS-, Beschleunigungs- oder auch Radarmessungen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit soll es sein, die Messgenauigkeit verschiedener Sportuhren zu untersuchen. Dabei unterliegen die eingesetzten Messverfahren ganz unterschiedlichen Fehlereinflüssen, die für die Genauigkeit von Bedeutung sind. So sollen die Geräte zunächst unter den jeweiligen Idealbedingungen und anschließend mit einzelnen möglichst isolierten Störquellen getestet werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 werden die unterschiedlichen Messverfahren allgemein beschrieben. Hier wird auch auf Fehlereinflüsse und Störquellen eingegangen.

In Kapitel 3 wird die Vorbereitung der Untersuchungen beschrieben. Hierbei werden nicht nur die genutzten Teststrecken vorgestellt, sondern auch die erzielbaren Genauigkeiten abgeschätzt.

In Kapitel 4 werden die einzelnen Tests ausgewertet. Dabei findet eine Unterteilung nach Geräten statt, wobei diese anschließend kurz miteinander verglichen werden.

Kapitel 5 dient der Zusammenfassung der Arbeit. Des Weiteren wird ein Ausblick über zukünftige Entwicklungen gegeben.

2. Technische Grundlagen

2.1 GPS – Global Positioning System

2.1.1 Einleitung

Das Global Positioning System (GPS) wird vom Verteidigungsministerium der USA, dem DoD (Department of Defense, Hauptsitz ist das sogenannte Pentagon in Washington D.C.), betrieben. Es wurde hauptsächlich für militärische Zwecke geplant und schließlich auch realisiert. Ursprünglich sollte das System aus 24 Satelliten bestehen, welche sich auf 6 fast kreisförmigen Umlaufbahnen in einer nominellen Höhe von 20.200 km in ca. 12 Stunden um die Erde bewegen (Ende 2006 waren es allerdings bereits 29 aktive Satelliten). Dank der nahezu flächendeckenden Verfügbarkeit kann man mit einem geeigneten Empfänger durch die Messung von Pseudoentfernungen zu mindestens 4 Satelliten seine Position fast überall auf der Erde bestimmen, was bereits aus dem eigentlichen Namen des Systems hervorgeht: NAVSTAR (Navigation System for Timing and Ranging). GPS kann man in ein Raumsegment, ein Nutzersegment und ein Kontrollsegment unterteilen.

2.1.2 Geschichtliche Entwicklung

1973 beschloss das US-Militär die Entwicklung eines neuen Satellitennavigationssystems ähnlich wie das seit 1958 existierende Transit-System der US-Marine, was aus 6 Satelliten in ca. 1200 km Höhe bestand (seit 31.12.1996 außer Betrieb). Nachdem in den folgenden Jahren einige Tests des Systems und der ersten Empfänger stattfanden, startete 1978 der erste Block I Satellit in den Weltraum (Block I ist die Bezeichnung für die Satelliten, welche für die Erprobungsphase des Systems vorgesehen waren). Die folgenden Jahre gab es kleinere Probleme und Rückschläge. So wurde der Nutzen des Systems immer wieder in Frage gestellt, Mittel gekürzt oder über den Einsatz von nur 18 Satelliten diskutiert. 1983 kam das US-Verteidigungsministerium zu dem Entschluss, das GPS-System auch für die zivile Nutzung zur Verfügung zu stellen. Ende der 80'er Jahre wurden die ersten Block II Satelliten gestartet und aktiviert und realisierten so die erste offizielle, volloperationelle Ausbaustufe des Systems. Für die zivile Nutzung wurde die Selective Availability (SA) eingeführt, welche durch eine künstliche Verschlechterung (Fehler größer als 100 m) implementiert war, weil Messungen mit Hilfe des zivilen C/A-Signals sehr viel höhere Genauigkeiten als erwartet aufwiesen. Am 8. Dezember 1993 wurde die erste Betriebsbereitschaft (Initial Operational Capability, IOC), nach Komplettierung der Satellitenkonstellation 1994 dann am 17.07.1995 die volle Betriebsbereitschaft (Full Operational Capability, FOC) bekanntgegeben. Seit Mai 2000 wurde die SA abgeschaltet, wodurch seitdem auch im zivilen Bereich höhere

Genauigkeit erzielbar ist. Im Moment wird das System ständig erweitert und modernisiert. So besitzt die neuste Generation von Satelliten (Block IIR-M) jeweils ein weiteres militärisches und ein weiteres ziviles Signal sowie genauere Atomuhren. In der Planung befinden sich desweiteren Block IIF- und Block IIIR-Satelliten. (kowoma, 2007)

2.1.3 Segmentierung des GPS-Systems

(Welt-)Raumsegment

Als Raumsegment oder auch Weltraumsegment bezeichnet man beim Satellitensystem GPS die Satelliten und deren Eigenschaften und Funktionen. Die mittlerweile ca. 30 aktiven Satelliten bewegen sich auf Umlaufbahnen in einer Höhe von 20.231 km innerhalb von 12 Stunden um die Erde. Sie befinden sich auf 6 verschiedenen Bahnebenen (mit einer Bahnneigung (Inklination) von 55° bezogen auf den Äquator). Sämtliche Satelliten sind mit hochgenauen Oszillatoren (Genauigkeiten von 10^{-12}s bis 10^{-13}s) ausgestattet, die für die Messung der GPS-Zeit (geringfügiger Unterschied zur UTC (Universal Coordinated Time)) zuständig sind. Die Satelliten senden kontinuierlich Signale aus, die sich aus der Grundfrequenz von 10,23 MHz ableiten lassen und die Trägerfrequenzen L_1 (1575,42 MHz) und L_2 (1227,6 MHz) besitzen. Auf der Trägerwelle von L_1 ist sowohl der P-Code (Precise-Code) als auch der C/A-Code (beides sogenannte PRN-Codes (Pseudo-Range-Noise-Codes)) moduliert, während auf L_2 nur der P-Code übertragen wird.

Kontrollsegment

Die Kontrolle über das Satellitensystem hat das US-Verteidigungsministerium. Zu deren Aufgaben gehören die Bestimmung von GPS-Zeit, die Vorausberechnung von Ephemeriden und die Übertragung und Speicherung der Korrekturdaten im Datenspeicher der Satelliten. Hierfür eingerichtet sind: Eine Hauptkontrollstation („Master Control Station“, Colorado Springs, USA), 10 weltweit verteilte Monitorstationen (siehe Abbildung 1) und zahlreiche Bodenantennen. Das Signal eines Satelliten erreicht so immer mindestens 2 Monitorstationen.

Abbildung 1: Verteilung von aktiven(rot) und passiven (violett) Monitorstationen, (kowoma, 2007)

Durch die Auswertung der Daten aller Monitorstationen in Echtzeit, lassen sich Informationen über Uhren und Bahnen der Satelliten gewinnen, die dann in Form von Korrekturdaten ein- bis zweimal am Tag per S-Band Signal (2000-4000MHz) übertragen werden.

Nutzersegment

Für die Nutzung des Satellitensystems GPS zur Positions- oder Zeitbestimmung benötigt man eine Empfangsanlage, die aus Antenne, Empfänger, Bedienfeld, Anzeige und Stromversorgung besteht. Heutzutage sind diese Komponenten meist zusammen in einem Gehäuse verbaut und teilweise so kompakt, dass sie in Armbanduhren integriert werden können. Hauptleistungsmerkmale bei GPS-Empfängern sind dabei die Anzahl der Kanäle (heute mindestens 12 Kanäle) und die Frequenzen, welche empfangen werden können. Außerdem ist das Auflösungsvermögen einer Wellenlänge entscheidend, da hiervon bei Phasenvergleichsmessungen die erzielbaren Genauigkeiten abhängen. Desweiteren unterscheidet man in Code- und Trägerphasenmessungen, wobei Geräte, die nur die Codemessung beherrschen wesentlich günstiger sind, als Empfänger, welche sowohl Code- als auch Trägerphasenmessung unterstützen.

2.1.4 Messverfahren

Codemessung

Die klassische Lösungsmethode zur Positionsbestimmung ist die sog. Codelösung. Hierbei wird ein vom Satellit ausgesendeter PRN-Code (Pseudo-Range-Noise-Code) empfangen, der auf eine Trägerwelle moduliert ist (siehe Abbildung 2):

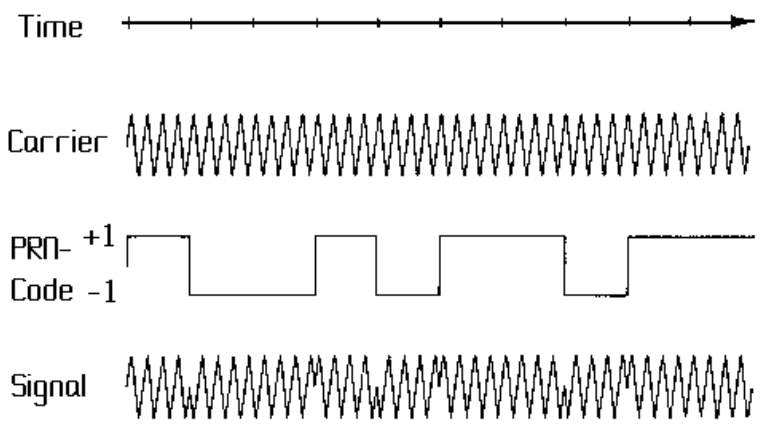


Abbildung 2: Das Signal ist der auf die Trägerfrequenz modulierte Code, (Seeber, 2003)

Im Empfänger wird ein identisches, aber phasenverschobenes Referenzsignal erzeugt. Das empfangene Signal und das Referenzsignal werden daraufhin so in der Phase bzw. Zeit gegeneinander verschoben, dass sie deckungsgleich sind. Aus der daraus resultierten Phasen- bzw. Zeitverschiebung kann dann mittels Wellenlänge bzw. Lichtgeschwindigkeit eine Pseudoentfernung zum Satelliten berechnet werden. Eine Positionsbestimmung ist mit mindestens drei gemessen Distanzen möglich (Kugelschnitt).

Trägerphasenmessung

Da die Wellenlänge der Codes um mehr als das hundertfache größer ist als die der Trägerwellen, kann bei der Messung der ankommenden Trägerphase eine wesentlich höhere Auflösung erzielt werden. Hierbei sind Genauigkeiten bei der Messung der Pseudoentfernung vom Empfänger zu den Satelliten durchaus im Submillimeterbereich angesiedelt. Es kann jedoch nur die „Restphase“ einer ankommenden Welle und nicht die Anzahl der „vollen“ Wellenlängen gemessen werden. Da die ganzzahligen Vielfachen der Wellenlängen zunächst nicht bekannt sind, bezeichnet man sie auch als „Ambiguity“ (Mehrdeutigkeit). Zur Lösung der Mehrdeutigkeiten gibt es verschiedene Verfahren und Algorithmen (Bildung von Dreifachdifferenzen, Kombination von Code- und Trägerphasenmessung, usw.). (Seeber, 2003)

2.1.5 Fehlereinflüsse

Theoretische Genauigkeiten

Durch die hohe Auflösungsmöglichkeiten der Wellenlängen sowohl bei Träger- als auch bei Codephasenmessung können theoretische Genauigkeiten für die Pseudoentfernung von < 0,2…2,5mm (Phasenmessung) und < 0,03 … 3,0m (Codemessung) erreicht werden. Die Genauigkeit wird jedoch verringert durch Fehlereinflüsse, die verschiedenste Einwirkungen auf die Messung bzw. das Signal haben können.

Ausbreitungsspezifische Effekte

a) Ionosphäre und Troposphäre

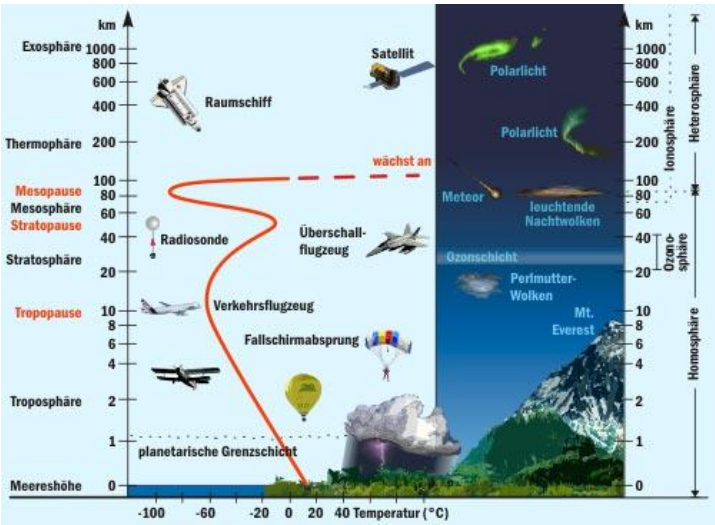


Abbildung 3: Atmosphäre, (kowoma, 2007)

Die Signale der Satelliten durchlaufen auf ihrem Weg zum Empfänger sowohl die Ionosphäre als auch die Troposphäre (siehe Abbildung 3). Die Ionosphäre befindet sich in ungefähr 80 bis 400 km Höhe und ist ein Teil der Atmosphäre der Erde, der räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterliegt. Sie ist mittags und in Äquatornähe wesentlich ausgeprägter als beispielsweise nachts an Orten mit höherer geographischer Breite (z.B. in der Nähe von Polen). Durch die hohe Elektronendichte im Inneren dieser Schicht, ist die Ionosphäre ein dispersives Medium, das einen Brechungsindex zwischen 0 und 1, abhängig von der Frequenz, annehmen kann und so auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der GPS-Trägerwellen beeinflusst. Entscheidend hierfür ist die Elektronendichte entlang des Ausbreitungsweges (Einheit: Total Electron Content). Modellbildungen der Ionosphäre sind sehr komplex, da das Medium lang- und kurzzeitigen unregelmäßigen Veränderungen, vor allem durch Sonnenaktivitäten verursacht, ausgesetzt ist. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des GPS-Signals wird innerhalb der Ionosphäre langsamer, was dementsprechend Auswirkungen auf die Berechnung der Pseudoentfernungen hat. Durch den Einsatz einer speziellen

Linearkombination von Phasenmessungen (Kombination von L_1- und L_2-Messungen) lässt sich dieser Einfluss jedoch eliminieren.

Die Troposphäre ist ein nicht-dispersiver Teil der Atmosphäre, der sich zwischen der Erdoberfläche und ca. 9 km Höhe befindet. Sie wird unterteilt in einen sehr genau modellierbaren trockenen und einen schwerer modellierbaren feuchten Anteil. Der Einfluss des trockenen Anteils ist ca. 10-mal größer als der des feuchten Anteils und besonders in äquatorialen Bereichen sehr hoch. Abhängig von der Wellenlänge werden Signale im GHz-Bereich (GPS-Signale) unterschiedlich stark gebrochen, was eine Verlangsamung der Ausbreitungsgeschwindigkeit zur Folge hat. Entscheidend für die Brechung des Signals ist dann vor allem noch die Elevation, unter welcher der jeweilige Satellit zum Empfänger steht. Je kleiner die Elevation desto größer ist auch der Einfluss auf die Signalausbreitung (Fermatsches Prinzip → Der Weg, den das Licht nimmt, um von einem Punkt zu einem anderen zu gelangen, ist stets so, dass die benötigte Zeit minimal ist). Durch gegebene Standardmodelle der Troposphäre kann dieser Einfluss auch weitestgehend eliminiert werden. (Kahmen, 1997)

b) Multipath

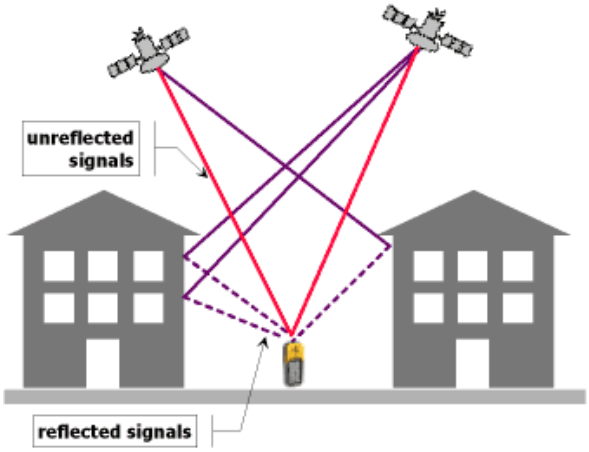


Abbildung 4: Mehrwegsausbreitung, (kowoma, 2007)

Treffen nicht nur Signale, die auf direktem Weg zur Antenne gelangen, sondern bei ungünstigen Bedingungen auch vom Boden oder anderen Flächen (z.B. Hauswänden) reflektierte Signale auf die Antenne, entsteht die sogenannte Mehrwegausbreitung (Multipath), die in Abbildung 4 dargestellt ist. Es entstehen Phasenfehler, aus denen dann fehlerhafte Entfernungen zu den Satelliten resultieren. Durch spezielle Abschirmeinrichtungen und/oder durch längere Beobachtungszeiten (ab 30 Minuten) wird der Effekt vermindert.

Satellitenspezifische Effekte

a) Orbitfehler

Satelliten bewegen sich auf fast kreisförmigen Umlaufbahnen (Orbits) um die Erde. Auf diese wirken jedoch verschiedene Kräfte wie z.B. die Inhomogenität der Erde oder die Erd- und Meeresgezeiten (variierende Gravitation der Erde), der (reflektierte) Strahlungsdruck der Sonne sowie Gravitation von Sonne und Mond, aber auch der atmosphärische Strömungswiderstand. Die daraus entstehenden Bahnstörungen nennt man Orbitfehler, aus denen dann neue Bahnparameter (Kepler Parameter) berechnet werden können. Die neuen hochgenauen Orbitparameter werden vom International GPS Service for Geodynamics (IGS) zur freien Verfügung angeboten.

b) Satellitenuhrfehler

Die Atomuhren der GPS-Satelliten (Genauigkeitsklasse 10^{-12} bis 10^{-14}) laufen zwar sehr genau, aber driften dennoch leicht. Der geringfügig unterschiedliche Verlauf der Zeitkurve zur GPS-Systemzeit kann durch ein Polynom 2. oder höherer Ordnung beschrieben werden. Für hohe Genauigkeiten kann der Satellitenuhrfehler aus den Uhr-Polynom-Koeffizienten der vom Satelliten gesendeten Navigation Message berechnet und angebracht werden. Die GPS-Zeit selbst wird durch die Mittelbildung von Ablesungen einer Gruppe von Atomuhren bestimmt.

Empfängerspezifische Effekte

a) Empfängeruhrfehler

Sind Satellitenuhr und Empfängeruhr nicht exakt synchronisiert, wird die Laufzeit falsch gemessen und eine falsche Pseudoentfernung zum Satelliten berechnet. Es ist jedoch technisch und vor allem finanziell nicht möglich die Synchronisation der meist wesentlich ungenaueren Empfängeruhren umzusetzen. Für die Positionsbestimmung führt man zu den drei Koordinaten, die über einen räumlichen Bogenschnitt (Kugelschnitt) berechnet werden also den Empfängeruhrfehler als weitere Unbekannte ein und benötigt so auch eine weitere unabhängige Pseudostreckenmessung zu einem weiteren Satelliten. Man benötigt also für die dreidimensionale Positionsbestimmung mindestens 4 Satellitensignale. (Kahmen, 1997)

b) Messrauschen und Antennenexzentrität

Beim Empfang von GPS-Signalen tritt Messrauschen auf. Es handelt sich hierbei um einen zufälligen Fehler, der somit nicht modelliert werden kann. Bei einer Antenne unterscheidet man in elektronisches Phasenzentrum und mechanisches Zentrum. Fallen das elektronische Phasenzentrum, in dem das Signal tatsächlich empfangen wird, und das mechanische Zentrum (geometrisches Zentrum der Antenne) nicht zusammen, so erhält man eine Antennenexzentrität, die aber in der Regel nur wenige Millimeter beträgt und durch Kalibrierung bestimmt werden kann.

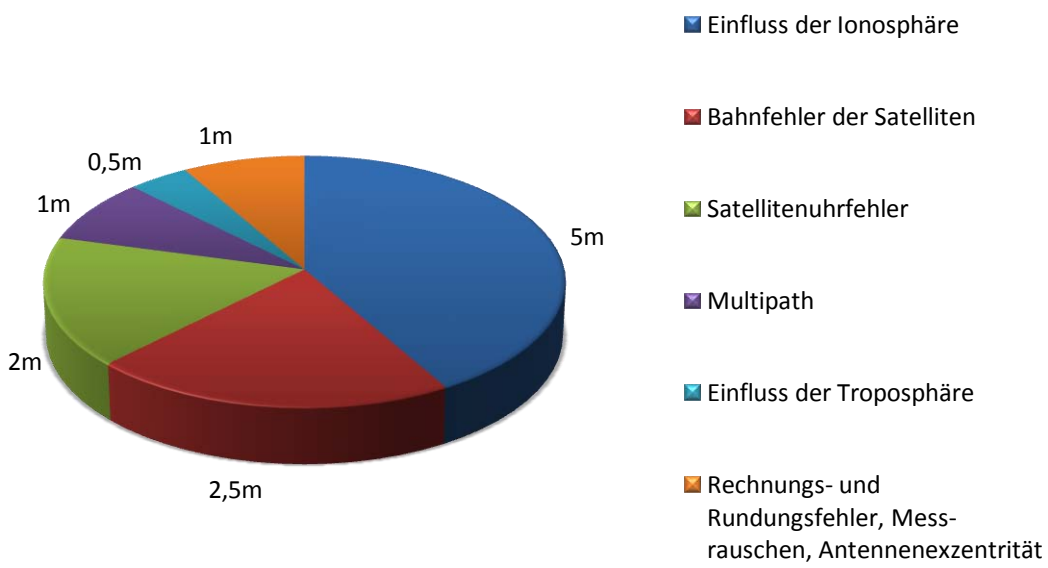
c) Relativistische Effekte

Die spezielle Relativitätstheorie besagt, dass Zeit bei schnellen Bewegungen langsamer vergeht als bei langsamer Bewegung oder gar Stillstand. Da sich Satelliten jedoch mit einer sehr hohen Geschwindigkeit (12.000 km/h) bewegen, laufen deren Uhren von der Erde aus betrachtet also langsamer, was aufgrund der relativistischen Zeitdilatation einen Zeitfehler von ca. 7,2 µsec/Tag ausmacht. Wesentlich größer ist aber die Zeitdilatation, die aus der allgemeinen Relativitätstheorie hervorgeht. Der Beobachter auf der Erde unterliegt einer größeren Gravitation als der Satellit in 20200 km Höhe, so dass die Uhr des Satelliten wiederum langsamer läuft (von der Erde aus betrachtet). Insgesamt würde der Gesamtfehler etwa 10 km pro Tag ausmachen, was jedoch durch die Frequenzänderung der Uhren von 10,23 MHz auf 10,229999995453 MHz (unter unveränderter Angabe von 10,23 MHz) kompensiert wird. (Seeber, 2003)

2.1.6 Genauigkeit

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung ist die Kombination aus Präzision (geringe Streuung) und Richtigkeit (tatsächliche Position). Maßgeblich sind hierbei die gemessenen Pseudostrecken zu den Satelliten. Die verschiedenen Fehlereinflüsse auf diese haben unterschiedlich große Auswirkungen auf die Genauigkeit, wie im folgenden Diagramm dargestellt ist:

Verhältnisse der Einflüsse und absolute Werte in [$\pm$m]



Insgesamt ergibt sich also ein Fehler der Strecken von $\pm$ 12 m, der aber mit Korrekturwerten durch Systeme wie WAAS und EGNOS auf bis zu $\pm$ 3…5 m, mit differentiellen GPS-Messungen sogar bis in den Millimeterbereich, verkleinert werden kann. Für die Genauigkeit der Positionsbestimmung muss jetzt allerdings zusätzlich noch die jeweilige Konstellation der Satelliten betrachtet werden, zu der der sogenannte PDOP (Position Dilution of Precision) berechnet wird. Dieser gibt an, wie hoch die Verringerung der Genauigkeit der Positionsbestimmung durch die Satellitenkonstellation ist. Bei besonders vorteilhaften Verteilungen der Satelliten nimmt der einheitenlose PDOP kleine Werte bis zum Minimum von 1 an. Ab einem Wert von 4 sind nur noch mäßige Genauigkeiten zu erwarten und Messungen mit einem PDOP von > 10 sind als unbrauchbar zu betrachten (siehe Abbildung 5).

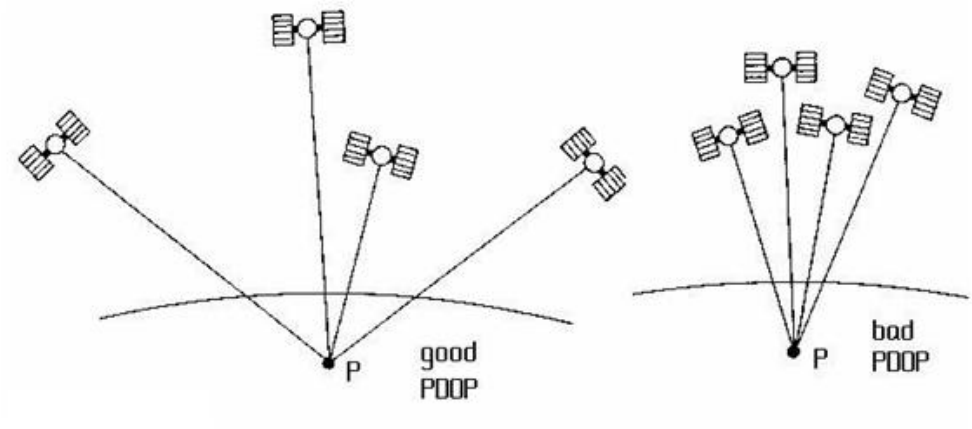


Abbildung 5: Position Dilution of Precision (PDOP), (Seeber, 2003)

Abhängig von den Fehlereinflüssen auf die Strecken und der Konstellation der Satelliten sind Genauigkeiten für die Positionsbestimmung von ca. $\pm$ 15 m ohne Korrekturdaten, ca. $\pm$ 1…3 m mit WAAS/EGNOS Verbesserungen und ca. $\pm$ 1…3 cm bei der Nutzung von Referenzdiensten (z.B. SAPOS) zu erwarten.

WAAS und EGNOS

Beim nordamerikanischen WAAS-System (Wide Area Augmentation System) und beim europäischen EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) handelt es sich um eine Art Differential GPS. Zusammen mit dem japanischen System MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System) werden sie als SBAS (Satellite Based Augmentation Systems) bezeichnet. Alle Systeme wurden vor allem für die Flugsicherung, speziell für Landeanflüge bei schlechter Sicht, entwickelt, da hier die Genauigkeit von normalen GPS-Messungen nicht ausreicht und Ausfälle oder eventuelle Fehler von Satelliten rechtzeitig an den Empfänger übermittelt werden können. Dafür wurden GPS-Referenzstationen (sogenannte RIMS = Ranging and Integrity Monitor Stations) aufgebaut, deren Position exakt bekannt sein muss. Diese empfangen beide GPS-Frequenzen und können so nicht nur die reine Differenz zwischen tatsächlichen und berechneten Stationskoordinaten berechnen, sondern auch Informationen über den Einfluss (Laufzeitverzögerung) der Ionosphäre auf das Signal ermitteln. Durch die Positionsbestimmung über mehr als 4 Satelliten können zusätzlich noch Ausfälle oder Fehlfunktionen einzelner Satelliten abgeleitet werden. Die Referenzstationen senden ihre Daten an ein Kontroll-/Rechenzentrum, welches dann Langzeitfehler der Satellitenpositionen, Kurz- und Langzeitfehler der Satellitenuhren, IONO Korrekturgitter und Integritätsinformationen errechnet. Besonders wichtig für zivile Nutzer sind die Streckenkorrekturdaten, welche durch die Signalverzögerung der Ionosphäre zustande kommen, da diese den größten Einfluss auf die Genauigkeit hat. Mit Hilfe der Daten aller Stationen kann hierfür ein Ionosphärenmodell (IONO Korrekturgitter) berechnet werden, dessen Werte an bestimmte geostationäre Satelliten (z.B. INMARSAT 3 – Satelliten, ARTEMIS) gesendet werden. Diese befinden sich in einer Höhe von 36000 km

über Zentralafrika (EGNOS) und senden wiederum für jeden GPS-Satelliten ein GPS-ähnliches Signal, was kompatible Empfänger (u.a. auch kleine Empfänger im Bereich der Fahrzeug- und Fußgängernavigation) dann mit 6 Sekunden Verzögerung (also fast Echtzeit) verwenden können (siehe Abbildung 6). So werden infolgedessen die gemessenen Pseudostrecken mit den gesendeten Daten von den WAAS-,EGNOS- oder MSAS-Satelliten korrigiert. Letztendlich kann eine Höhengenauigkeit von $\pm$ 2…4 m und eine Lagegenauigkeit von $\pm$ 1…3 m erreicht und Fehlfunktionen innerhalb von 6 Sekunden an den Nutzer übermittelt werden (ESA, 2007). Probleme ergeben sich jedoch beispielsweise dadurch, dass ein Empfang der EGNOS-Daten in Deutschland nur unter einer geringen Elevation von ca. 15 bis 35° möglich ist, was leicht zu Abschattungen führen kann. Außerdem können ohne eine Kontrolle des Gültigkeitsbereichs der empfangenen Daten auch Korrekturen von typischen WAAS-Satelliten (z.B. INMARSAT 3 über der Ostküste Brasiliens) angebracht werden, die die Positionsgenauigkeit teilweise stark verringern und zu schlechteren Ergebnissen als ohne Korrekturdaten führen können.

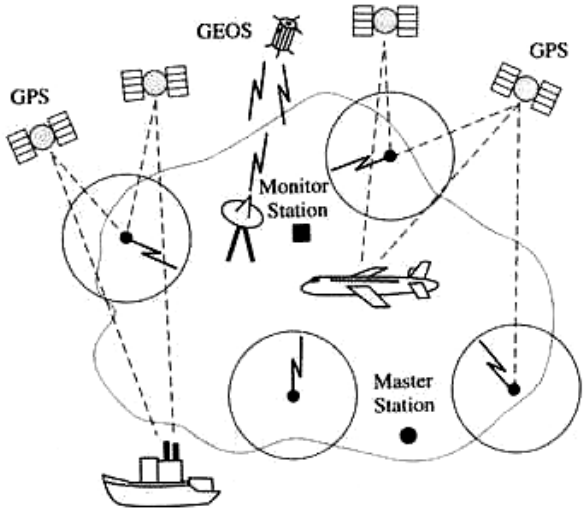


Abbildung 6: Aufbau/Prinzip eines Wide Area DGPS wie EGNOS, (Seeber, 2003)

Differentielle GPS-Messung (DGPS)

Mit Hilfe der differentiellen Messmethode können sehr hohe Genauigkeiten erreicht werden, wobei es grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur DGPS-Messung gibt. Entweder wird eine Basisstation auf einem Punkt mit bekannten Koordinaten aufgestellt und die aus den Differenzen zwischen Ist- und Sollwerten der Streckenmessungen zu Satelliten resultierenden Streckenkorrekturdaten per Funk, Bluetooth, usw. an einen Rover (zweiter Empfänger) gesendet oder die Korrekturdaten werden von einem Anbieter bezogen, der selbst Referenzstationen betreibt. Dabei geht man davon aus, dass die Fehler, die durch äußere Einflüsse auf die Strecke wirken, in der Nähe der Referenz-/Basisstation ähnlich groß sind wie Fehler bei den Referenzen selbst. Die Stationen des Satellitenpositionierungsdienstes, kurz SAPOS®, sind beispielsweise flächendeckend in ganz Deutschland verteilt. Streckenkorrekturen können entweder über Funk oder GPRS

(Handy) kostenpflichtig in Echtzeit empfangen und angebracht werden, oder nach der Messung im Postprocessing (Nachbearbeitung) verarbeitet werden. Zusätzlich kann eine sogenannte virtuelle Referenzstation über Interpolation zwischen den umliegenden Stationen berechnet werden. Grundsätzlich ist die Genauigkeit bei der Positionierung per DGPS abhängig vom Abstand zu den Referenzstationen und der Qualität der Koordinaten der Referenzpunkte, und kann teilweise bis in den Millimeterbereich steigen. GPS-Empfänger für den „Outdoor“-Bereich nutzen immer häufiger EGNOS- oder WAAS-Daten (Wide Area DGPS).

2.1.7 GPS-Empfänger, Funktionsweise & Auswertegang

Beim Aussenden der Signale eines Satelliten wird nicht nur der Code, sondern auch eine Navigationsnachricht auf die Trägerwelle L1 moduliert. Diese Nachricht besteht aus mehreren Blöcken, welche Uhrenparameter (GPS-Woche, Satellitenuhrfehler bzw. -korrektionswert, usw.), Ephemeriden (Kepler-Parameter der Umlaufbahn, usw.) und Almanach-Daten (Informationen über Konstellation, Ephemeriden, Uhrparameter und Funktionsfähigkeit aller aktiven Satelliten des GPS-Systems sowie Parameter für die ionosphärische Korrektion, usw.) enthalten. Die zum Empfang der Daten notwendigen aktiven (mit Vorverstärker) oder passiven GPS-Antennen werden heute meist mit dem Empfänger selbst in einem Gehäuse verbaut. Wichtigste Komponente des Empfängers ist der verwendete Chipsatz, welcher als Kombination mehrerer zusammengehöriger Schaltkreise anzusehen ist, die sowohl für die Kommunikation mit der Antenne als auch die Verwaltung/Weiterverarbeitung und der dafür erforderlichen Kommunikation mit Speicher und/oder Ausgabeschnittstellen (Displays) zuständig ist. Unterschiede der Chipsätze zeigen sich in der Art bzw. dem Einsatz der Korrelationsempfänger und bei der Signalempfindlichkeit. Während herkömmlichen Empfänger die Korrelationen der Codefolgen, die in Phase bzw. Zeit gegen das Referenzsignal verschoben werden, einzeln nacheinander berechnen und überprüfen, werden bei modernen Chipsätzen (z.B. SiRF SiRFstar III, u-blox ANTARIS4, u-blox 5) gleich 200.000 Korrelationen parallel ermittelt und geprüft, was eine erhebliche Reduzierung des zeitlichen Aufwands zur ersten Positionierung („TTFF“ = Time To First Fix) mit sich führt. Das US-Verteidigungsministerium - als Betreiber des GPS-Systems - garantiert eine Signalstärke von -130 dBm, gleichzeitig sind moderne Empfänger in der Lage Signale bis ca. -160 dBm zu verarbeiten. Falls das Signal also nur bis maximal 30 dBm abgeschwächt wird, funktionieren besagte Geräte auch noch in stärker bewaldeten Gebieten oder sogar in Gebäuden. Zur Weiterverarbeitung ist die Kommunikation zwischen Empfänger und PC, Laptop, Ausgabegerät usw. erforderlich. Dabei wird das NMEA(-0183)-Protokoll verwendet, dessen Standards dafür sorgen, dass Daten im ASCII (American Standard Code for Information Interchange) jeweils von einem sendenden Gerät zu einem oder mehreren empfangenden Geräten übermittelt werden.

Zur Navigation mit GPS werden verschiedene Beobachtungsmodi genutzt. Dabei unterscheidet man in absolute und relative Beobachtungen. Die ermittelten

Pseudostrecken resultieren dabei zunächst erst einmal aus der Navigationslösung, die durch die Codemessung zustande kommt. Zur Genauigkeitssteigerung wird diese entweder mit der Phasenmessung kombiniert oder deren gemessene Strecken durch zusätzliche Trägerphasenmessung (ohne Mehrdeutigkeitslösung) geglättet (carrier-smoothed pseudoranges), (Seeber, 2003). Für die Anzeige von Geschwindigkeiten oder der zurückgelegten Strecke in Echtzeit wird meist das Kalman Filter verwendet. Hierbei wird aus der aktuellen Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung die Position zu einem beliebigen Zeitpunkt abgeschätzt (prädiziert). Nach Messung des „Ist-Zustands“ wird die prädizierte Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung ausgeglichen. Man spricht auch von einer sequentiellen Ausgleichung (Niemeier, 2002). Zur Speicherung der Tracks (zurückgelegter Weg), aber auch zur Anzeige der Distanz, Geschwindigkeit können weitere Filter (meist nachträglich) angebracht werden. Vorstellbar sind hierbei diverse Liniengeneralisierungsverfahren (z.B. Sampling, Douglas-Peucker-Algorithmus, usw.), die Punkte, die bezogen auf den zurückgelegten Weg (Track) eine geringe Signifikanz aufweisen, löschen oder in ihrer Lage verschieben. Dies führt zu einer Glättung des Tracks, was zu einer Genauigkeitssteigerung aber auch zu einem Genauigkeitsverlust beitragen kann (abhängig vom tatsächlichen Weg und der Aufzeichnungsrate).

2.2 Fahrradcomputer

2.2.1 Einleitung

Mit einem Fahrradcomputer lassen sich verschiedene fahrdynamische Parameter erfassen und anzeigen. Es handelt sich um ein elektronisches Messgerät, welches die Daten kontinuierlich während der Fahrt registriert. Sowohl die Geschwindigkeit als auch die zurückgelegte Strecke können von jedem Gerät angezeigt werden, darüber hinaus lassen sich – je nach Ausstattung und Preisklasse des Fahrradcomputers - aber auch eine Vielzahl anderer Daten erfassen.
Besonders interessant sind die erfassten und gespeicherten Parameter für Radsportler, da sich bei einigen Geräten die Parameter nach der Tour am PC auslesen und analysieren lassen. Dies ermöglicht eine hochgradig effiziente Trainingsgestaltung.

Abbildung 7: Einfacher Fahrradcomputer

2.2.2 Geschichtliche Entwicklung

Ursprünglich diente ein „Fahrradcomputer“ nur der Geschwindigkeits- und Entfernungsanzeige. Im Laufe der Jahre hat sich das Gerät von einem antiken Schrittzähler zu einem High-Tech-Computer entwickelt, der immer mehr Funktionen in sich vereint.
Erste Streckenmessungen wurden schon während der Zeit von Alexander dem Großen im antiken Griechenland getätigt. Hier kamen speziell ausgebildete menschliche Schrittzähler, sogenannte Bematisten, zum Einsatz. Durch das Zählen ihrer Schritte konnten sie mit erstaunlicher Genauigkeit Wegstrecken bestimmen. In der Naturalis Historia von Plinius wurden einige Messergebnisse von zwei Bematisten Alexanders festgehalten, denen zufolge ein durchschnittlicher Fehler von nur 4,2% bei sehr langen Strecken z.T. über einige hundert Kilometer aufgetreten sein soll. Diese Ergebnisse sind so genau, dass bereits hier von der Verwendung von mechanischen Geräten ausgegangen wird (Engels, 1978). Allerdings wurden noch keine Beweise für deren Einsatz gefunden.
Die technische Grundlage wurde zwischen 27 und 23 v. Chr. von einem römischen Ingenieur namens Vitruvius gelegt, der den ersten in der Literatur beschriebenen mechanischen Kilometerzähler konstruierte. Er entwickelte ein durch ein Rad

angetriebenes maschinenmäßiges Zählwerk, um die zurückgelegte Wegstrecke von Mietkarren zu ermitteln. Auf diese Weise wurden auch die römischen Straßen vermessen. Bei einem Kilometerzähler, auch Hodometer genannt, werden durch das rotierende Rad Zählimpulse erzeugt, welche vom Zählwerk registriert, aufsummiert und als zurückgelegte Wegstrecke in der Einheit Kilometer angezeigt werden. Erfolgt die Streckenberechnung eines mechanischen oder elektronischen Gerätes durch das Zählen von Schritten, so wird von Pedometern gesprochen.
Im alten China entwickelte sich ein zu Vitruvius Idee ähnliches Prinzip. Diversen Literaturangaben aus dem dritten Jahrhundert zufolge wurde ein Wagen („Trommelwagen“) geschoben, der nach jedem zurückgelegten Li[1] eine Trommel schlug und nach zehn Li einen Gong ertönen lies.
Nach dieser Grundfunktionsweise arbeiten noch heute die Kilometerzähler in diversen Fahrzeugen. Allerdings wurde im Laufe des 20. Jahrhundert bei den meisten Geräten das mechanische Zählwerk durch elektromechanische und zunehmend elektronische Bauteile ersetzt.

1885 kam es bei österreichischen Militärfahrrädern zur ersten Spezialisierung für das Zweirad. Die zurückgelegte Wegstrecke wurde mit einem Zyklometer (griech.: *κύκλος*, *Zyklo* = Kreis, Ring) erfasst. Das Prinzip ist dabei, dass sich die zurückgelegte Wegstrecke ergibt, indem man die Anzahl der einzelnen Radumdrehungen aufsummiert, wobei der Radumfang genau der bei einer Radumdrehung gefahrenen Strecke entspricht.
An einer Speiche wird dazu ein Mitnehmer befestigt, welcher beim Drehen des Rades über ein Getriebe das mechanische Zählwerk weiterstellt. Das zwischengeschaltete Getriebe mit seiner speziell auf die Größe des Rades eingestellten Übersetzung ist dafür verantwortlich, dass das Zählwerk synchron zur tatsächlich zurückgelegten Wegstrecke arbeitet und dadurch die korrekte Kilometerzahl anzeigt. In den meisten Fällen ist die Übersetzung des Getriebes dabei nicht veränderbar, wodurch ein Zyklometer immer nur mit einer speziellen Reifengröße kombinierbar und funktionstüchtig ist.
Mechanische Tachometer stellten eine Weiterentwicklung des einfachen Zyklometers (Kilometerzählers) dar, denn nun ließ sich neben der gefahrenen Strecke auch die Momentangeschwindigkeit anzeigen. Hierzu wurde die Anzeigeeinrichtung am Lenker direkt über eine mechanische, biegsame Welle mit einem Aufnehmer an der Vorderradachse verbunden. Wie das Zyklometer ist auch das mechanische Tachometer nur für eine spezielle Radgröße ausgelegt.

Ähnlich wie bei dem reinen Kilometerzähler wurden auch bei den speziell für Fahrräder ausgelegten Zyklometern im Laufe der Zeit die mechanischen Bauteile zunehmend zunächst durch elektromechanische und dann durch elektronische Bauelemente ersetzt.
In den 1980er Jahren kamen die ersten Fahrradcomputer auf den Markt. Die Entwicklung bzw. Verbesserung von Mikroelektronik und LCD-Displays[2] stellten dabei eine sehr bedeutende Grundlage dar. So ließen sich die zuvor recht sperrigen Computer immer kleiner und damit auch mobiler gestalten, während auch der Stromverbrauch stark reduziert werden konnte. Diese Geräte beherrschten zunächst hauptsächlich die

[1] Li = 0,5755 km (altchinesische Längeneinheit)
[2] LCD = Liquid Chrystal Display, Flüssigkristallbildschirm

Anzeige von Momentan- und Durchschnittsgeschwindigkeit sowie die zurückgelegte Wegstrecke und auch eine Zeitangabe. (Wikipedia "Fahrradcomputer", 2007)

2.2.3 Funktionsprinzip und Weiterentwicklungen

Seit der Einführung der Mikroelektronik arbeiten Fahrradcomputer nach dem gleichen Grundprinzip:
Dazu müssen zwei Elemente am Rad angebaut werden. An einer Speiche (meistens des Vorderrades) wird ein kleiner Magnet befestigt, welcher durch die Rotation des Rades in einer an der Gabel angebrachten Spule ein Spannungsimpuls induziert. Als zweite Variante kann auch ein Magnetschalter ausgelöst werden.
Das so erhaltene Signal wird dann per Kabel zum eigentlichen Fahrradcomputer übermittelt, welcher üblicherweise am Lenker montiert ist. Hier werden die Spannungsimpulse gezählt, ausgewertet und daraus die fahrdynamischen Parameter berechnet. Die Anzeige erfolgt dann mittels LCD-Display.
Der Grundgedanke bei der Berechnung ist, dass aus der Umdrehungsgeschwindigkeit, also dem zeitlichen Abstand der induzierten Spannungsimpulse, und dem Radumfang die zurückgelegte Strecke ermittelt werden kann. Die zurückgelegte Wegstrecke s ergibt sich (falls kein Schlupf vorhanden ist) nach der einfachen Formel

$$s = 2\pi \cdot R \cdot n = U \cdot n$$

Formel 2-1

wobei R dem Radius, U dem Umfang und n der Anzahl der Umdrehungen (bzw. Impulse) entsprechen. Unter Berücksichtigung der Zeit lassen sich daraus verschiedene Parameter wie Momentangeschwindigkeit, Durchschnittsgeschwindigkeit, Maximalgeschwindigkeit oder auch die reine Fahrzeit ableiten und auf dem Display ausgeben.
Zu Trittfrequenz- und Leistungsmessungen werden ähnlich wie bei der Wegstreckenermittlung Impulse des Sensors über eine gewisse Zeit bzw. Strecke registriert.
Ein bedeutender Vorteil eines Fahrradcomputers gegenüber den vorherigen mechanischen Kilometerzählern bzw. Zyklometern ist die Möglichkeit, dass nun die Radgröße per Tastendruck eingestellt werden kann. Damit werden die Geräte unabhängig von einer fest vorgegebenen Radgröße und sind somit zu jedem Fahrrad kompatibel.

Ab den 1990er Jahren wurde der ursprüngliche Fahrradcomputer dann immer mehr spezialisiert und somit den verschiedenen Ansprüchen der Nutzer angepasst. So kamen vor allem für Radsportler sehr viele weitere Funktionen hinzu, die das Training effizienter und attraktiver gestalten können. Verschiedene Sensoren an der Tretkurbel oder der Hinterradachse können beispielsweise die Trittfrequenz und die vom Fahrer erzeugte Leistung durch Messung des aufgebrachten Drehmoments anzeigen. Ebenfalls sehr wichtig für ein wirkungsvolles Training ist die Messung des Pulsschlages. Diese

geschieht meistens mit einem Brustgurt, welcher über Funk die Daten an den Computer sendet. Dem Sportler wird dadurch ermöglicht, seine Trainingsbelastung immer seinem aktuellen Puls anzupassen, um optimale Effizienz zu erzielen und eine Gesundheitsgefährdung durch Überforderung zu vermeiden.
Die Funktion des Herzschlagmessens lässt sich gut mit einer Höhenmessung verbinden, da die körperliche Belastung bei Bergfahrten zunimmt und somit eine enge Korrelation zwischen überwundenen Höhenmetern und der Herzfrequenz besteht. Dabei wird am häufigsten die Höhe über dem Meeresspiegel mittels barometrischer Höhenmessung (Abschnitt 2.5) bestimmt. Anhand dieser Messdaten lassen sich verschiedene weitere Parameter wie Steigungen bzw. Gefälle oder die Anzahl der überwundenen Höhenmeter ableiten.
Eine andere, etwas neuere Funktion ist die Verwendung von GPS, dem Global Positioning System (Abschnitt 2.1). Das System ermöglicht eine exakte Standortbestimmung mit Hilfe von Satelliten und wird für Fahrradcomputer ab etwa 2002 eingesetzt. Hier eröffnen sich vielseitige Möglichkeiten: Über die Veränderung der Positionskoordinaten beim Radfahren lässt sich ebenfalls die Geschwindigkeit ermitteln. Beim GPS werden 3D-Koordinaten bestimmt, d.h. man erhält auf diese Weise neben der eigentlichen Strecke, dem Track auch einen Höhenwert an jeder Position. Des Weiteren lassen sich mit einigen Geräten einfache Navigationen zu eingegeben Punkten durchführen.
Durch die Speicherung der Koordinaten und zusätzlicher Parameter wie z.B. dem Herzschlag kann nach der Tour eine genaue Auswertung und Analyse des Trainings am PC erfolgen. Die gefahrenen Tracks lassen sich nach der Übertragung auf dem Computer anzeigen. Auch die Visualisierung eines Höhenprofils mit den jeweiligen Pulswerten und ggf. der durch die Trittfrequenz erzeugten Leistung erlauben viele Auswertungen und Effizienzsteigerungen für das nächste Training.
Ein weiterer Verwendungszweck von GPS ist seit 2004 der Fahrradtourismus. Dabei ermöglichen kleine Navigationsgeräte für Fahrräder das Abfahren einer bestimmten Route und stellen Informationen an Sehenswürdigkeiten bereit. Dieses Anwendungsgebiet ist derzeit noch nicht völlig ausgereift. Vor allem die kurze Akkulaufzeit von nur ca. vier Stunden aufgrund des verhältnismäßig viel Strom verbrauchenden Farbdisplays und der hohen Rechenleistung stellen derzeit noch Probleme für einen optimalen Einsatz dar.

Daneben hat sich auch die Technik des Fahrradcomputers an sich leicht geändert. So wurden nach und nach Verbesserungen eingeführt wie z.B. eine Funkübertragung anstelle der Kabelverbindung zwischen der Spule an der Gabel und dem Rechner am Lenker. Auf diese Weise entfällt die hinderliche Befestigung des Kabels am Fahrradrahmen und die Computer lassen sich schneller an andere Räder montieren.

2.2.4 Fehlereinflüsse

Für die Genauigkeit der ermittelten Geschwindigkeit und zurückgelegten Wegstrecke ist besonders die Kenntnis der exakten Größe des Reifenumfangs bzw. des Radius von Bedeutung. Dies ist die einzige Größe, die direkt in Formel 2-1 zur Streckenberechnung mit einfließt. Wird eine falsche Größe ermittelt, so wirkt sich dieser Fehler auch auf alle anderen davon abgeleiteten fahrdynamischen Parameter wie beispielsweise die Geschwindigkeitsangaben in Form eines Maßstabsfaktors aus.
Bei der Installation des Fahrradcomputers kann der Reifenumfang eingegeben werden. Für eine präzise Wegermittlung muss dieser folglich zunächst möglichst exakt ermittelt werden. Abnutzungseffekte des Reifens und Veränderungen des Luftdrucks führen Reifenumfangsabweichungen mit sich, woraus folgt, dass der Einstellungsvorgang für genaue Messwerte in gewissen Zeitabständen zu wiederholen ist.
Die einfachste, aber unpräziseste Variante ist das unmittelbare Ablesen der Reifengröße auf dem Fahrradreifen. Der (mittlere) Reifenumfang kann einer Tabelle entnommen und am Fahrradcomputer eingestellt werden.
Eine andere Möglichkeit besteht in der Messung des äußeren Raddurchmessers mit Hilfe eines Maßbandes. Der so erhaltene Wert muss mit der Kreiszahl Pi ($\pi \approx 3{,}14$) multipliziert werden, um daraus den Reifenumfang zu erhalten.

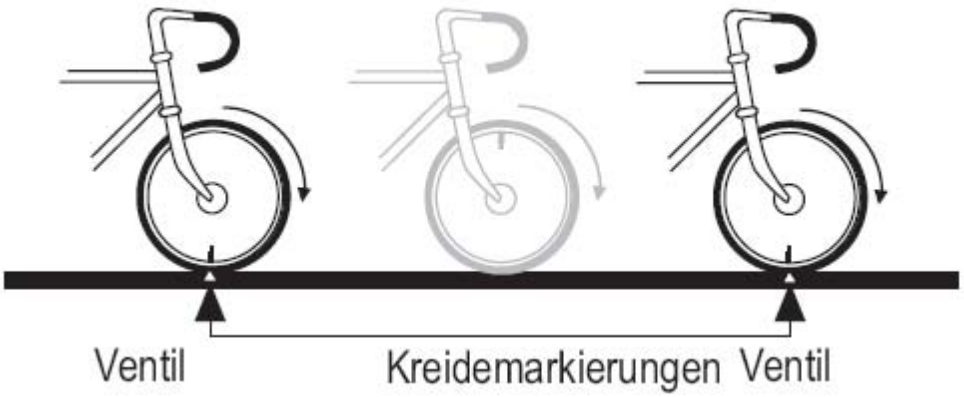


Abbildung 8: Abrollmethode (Bedienungsanleitung Kabelloser Fahrradcomputer GT 7316)

Etwas aufwändiger ist die in Abbildung 8 dargestellte „Abrollmethode“. Hierbei wird eine Stelle auf dem Reifenmantel markiert oder man benutzt eine markante Stelle des Reifens, etwa das Ventil. Befindet sich die Markierung unten, wird die Kontaktstelle zwischen Reifen und Boden beispielweise mit einem Kreidestrich auf dem Boden kenntlich gemacht. Daraufhin setzt sich der Fahrer auf das Rad und rollt möglichst gerade los, bis die Markierung nach einer Reifenumdrehung wieder am untersten Punkt angelangt ist. Nach der erneuten Markierung auf dem Boden wird die Strecke zwischen den beiden Marken ausgemessen und die Größe - meistens in der Einheit Millimeter - in den Computer eingegeben. Zur Genauigkeitssteigerung kann der Vorgang mehrmals wiederholt werden, als Umfang ist dann der Mittelwert der Messungen in das Gerät einzugeben.

Bei diesem Verfahren gibt es zahlreiche Veränderungen, um die Genauigkeit zusätzlich zu steigern. So lassen sich als Markierungen anstelle des Ventils zum Beispiel abfärbende Substanzen wie ein kleiner Klecks Senf direkt auf den Reifenmantel auftragen. Durch die Vorwärtsbewegung des Fahrrades entstehen zwei Farbabdrücke auf dem Boden, deren Abstand genau dem Reifenumfang entspricht. Die Ungenauigkeit durch die relativ dicke Markierung mit Kreide auf dem Boden entfällt auf diese Weise. Je feiner die jeweiligen Kontaktstellen auf dem Boden dargestellt werden, umso genauer lässt sich anschließend der Reifenumfang bestimmen. Des Weiteren ist es während des Abrollvorganges wichtig, dass die Reifen mit dem Gewicht des Fahrers belastet werden, da sich hierdurch der Luftschlauch verformt und sich der Luftdruck im Inneren verändert.

Generell wirkt sich der Luftdruck im Schlauch auf den Reifenumfang aus. Vor der Ausmessung des Umfanges ist dementsprechend immer zuvor der Luftdruck für die anschließende Fahrt aufzubringen. Es muss bedacht werden, dass der Luftdruck im Laufe der Zeit ohne äußere Einflüsse auf Grund der Materialeigenschaften des Reifens sinkt.
Das Verhalten der Luft im Reifen kann mit der allgemeinen Zustandsgleichung eines idealen Gases (Tipler & Mosca, 2006) genährt beschrieben werden:

$$\boldsymbol{p \cdot V = m \cdot R_S \cdot T}$$

Formel 2-2

mit p = Druck

V = Volumen

m = Masse

R_S = Spezifische Gaskonstante

(bei Luft: $R_{S,Luft} = 287\frac{J}{Kg \cdot K}$, mit J = Joules und K = Kelvin)

T = Temperatur

Aus Formel 2-2 wird deutlich, dass der Luftdruck vom Volumen, der Masse sowie der Temperatur abhängig ist. Da der Quotient aus Masse und Volumen der physikalischen Größe Dichte (ρ) entspricht, lässt sich das Gesetz ebenfalls beschreiben als:

$$p = \rho \cdot R_S \cdot T$$

Formel 2-3

Der Luftdruck verändert sich folglich, wenn entweder das Volumen (und somit die Dichte der Luft) oder die Temperatur variiert. Setzt sich der Fahrer auf sein Fahrrad, so wird der Reifen belastet und das Volumen des Schlauches ändert sich geringfügig, wodurch es zu einer Variation des Luftdrucks kommt. Dieser Zusammenhang lässt sich mit dem Mariotte'schen Gesetzt (Formel 2-4) begründen, welches besagt, dass bei

idealen Gasen bei konstanter Temperatur das Produkt aus Druck und Volumen konstant bleibt.

$$p \cdot V = konstant$$

Formel 2-4

Wird angenommen, dass das Volumen konstant ist, so ist der Luftdruck noch von der Temperatur abhängig, da die Dichte eines Stoffes mit der Temperatur variiert. Dem Gasgesetz von Gay-Lussac zufolge, verhält sich das Volumen bei einer gleichbleibenden Stoffmenge idealer Gase direkt proportional zur Temperatur. Die Luft dehnt sich also bei Erwärmung aus und zieht sich bei einer Abkühlung zusammen.

$$\frac{V}{T} = konstant$$

Formel 2-5

Somit ist der Luftdruck u.a. von der Umgebungstemperatur abhängig. Fällt die Temperatur, so folgt ihr der Druck im gleichen Maß nach unten. Während der Fahrt - besonders mit hohen Geschwindigkeiten - erhitzen sich die Luftmoleküle im Schlauch, wodurch es ebenfalls zu einer minimalen Änderung des Luftdrucks im Reifen und somit auch des Reifenumfangs kommt.

Bei einem normalen Fahrradcomputer haben die eben beschriebenen Phänomene allerdings kaum Auswirklungen. Wird z.B. angenommen, dass eine Messung des Radumfangs um 5 mm (2075 mm) von der tatsächlichen Größe 2070 mm abweicht, so ergibt sich ein Fehler von 0,24%. Bei einer Radtour von 50 km entspricht das einem Fehler von nur 120 Metern. In Bezug auf die Geschwindigkeit ist die Auswirkung der Abweichung noch geringer. Durch die Verfälschung fährt man beispielsweise 35,0875 km/h statt 35 km/h. Abhängig von der Anzeigegenauigkeit des Displays macht sich der Fehler bei einer angezeigten Nachkommastelle gerundet mit 1/10 km/h bemerkbar.

Neben dem Reifenumfang können auch andere, eher zufällige und selten auftretende Einflüsse die Ergebnisse des Fahrradcomputers negativ beeinträchtigen. Dazu gehören Aussetzer bei der Funkübertragung zwischen Sensor und Computer, welche häufig in der Nähe von Starkstromleitungen auftreten. Auf rutschigen Untergründen kann es außerdem zu Schlupf kommen, so dass die zurückgelegte Strecke nicht vollständig registriert wird.

2.3 Radar

2.3.1 Einleitung

Radar ist die Abkürzung für den englischen Ausdruck „radio (aim) detection and ranging“, welcher während des Zweiten Weltkrieges entstand und auf Deutsch etwa soviel wie „Funkerkennung und Entfernungsmessung von Flugzielen“ bedeutet. Dabei handelt es sich um ein auf elektromagnetischen Wellen basierendes Ortungssystem. Das Einsatzgebiet hat sich über die Detektion von Flugzielen hinaus vergrößert, weshalb heutzutage das „aim“ meistens entfällt.
Von einem Sender werden über eine Antenne Mikrowellen mit Wellenlängen zwischen 1mm und 1m ausgesandt, die auf ein Objekt treffen und von diesem reflektiert werden. Das zurückgeworfenen Signal, genannt „Echo“, wird wieder vom Radargerät empfangen und ausgewertet. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Informationen wie Richtung, Entfernung zum Objekt oder auch Objekteigenschaften wie Kontur oder Oberflächenbeschaffenheit zum Teil über sehr große Distanzen und nahezu wetterunabhängig zuverlässig ermitteln.

2.3.2 Geschichtliche Entwicklung

Die Grundlage für das Prinzip des Radars stellte der englische Physiker James Clerk Maxwell 1864 mit seiner elektromagnetischen Lichttheorie auf, in der er die Beschreibung und das Ausbreitungsverhalten von elektromagnetischen Wellen schilderte. Erst 1886 gelang es dem deutschen Physiker Heinrich Rudolf Hertz, die elektromagnetischen Wellen experimentell nachzuweisen, wodurch die Maxwell‘sche Theorie bestätigt werden konnte.
Zehn Jahre später übermittelte der italienische Ingenieur Guglielmo Marconi erstmals mittels Richtantenne Signale über drei Kilometer Entfernung.
Das Jahr 1904 war von besonderer Bedeutung. Der deutsche Ingenieur und Elektrotechniker Christian Hülsmeyer stellte in Experimenten fest, dass ausgestrahlte elektromagnetische Wellen von Metallflächen reflektiert werden. Dieses Verhalten wollte er sich für die Erkennung entfernter metallischer Objekte, insbesondere zur Verkehrsüberwachung auf dem Wasser, zu Nutze machen und entwickelte ein Telemobiloskop, welches die Laufzeit der von einem Schiff reflektierten Wellen ermitteln konnte. So wurde das erste radarbasierende Ortungssystem entwickelt, welches sowohl in Deutschland als auch in Großbritannien patentiert wurde.
1921 erfand Albert Wallace Hull mit dem Magnetron eine leistungsfähige Senderöhre. Ein Jahr danach gelang dem Naval Research Laboratory (USA) die erstmalige Ortung eines hölzernen Schiffes. Ebenfalls das Naval Research Laboratory schaffte 1930 die erste erfolgreiche Ortung eines Luftfahrzeuges.

In der folgenden Zeit wurden einige tiefergehenden Forschungen betrieben, z.B. wurden Signalverstärker entwickelt und das erste Schiff mit einem eigenen Radarsystem, also Sende- und Empfangsantenne, ausgerüstet.
1935 entwickelte Robert Watson-Watt das erste funktionierende Luftfrühwarnsystem, welches Flugzeuge zwischen 10 und 60 km Entfernung detektieren konnte. Im Osten und Süden der Britischen Inseln wurde das System von der Royal Navy bereits installiert, was während des 2. Weltkrieges von großer militärischer Bedeutung war.
John Randall und Henry Boot, zwei Physiker der Universität Birmingham in England, brachten 1939 die Wende im U-Boot-Krieg, indem sie ein leistungsstarkes Mikrowellenradargerät entwickelten und in B-17 Bomber einbauten.
Durch den ausgebrochenen 2. Weltkrieg und die zunehmende Bedeutung der Luftwaffe verstärken sich die Entwicklungen im Bereich der Radartechnik stark. In Frankreich, Russland, Japan, Deutschland und in den USA wurden unterschiedliche Radaranlagen entwickelt.
Nach dem 2. Weltkrieg kamen in Deutschland vor allem während des Kalten Krieges viele Radargeräte an der innerdeutschen Grenze zum Einsatz.
Heute haben Radarsysteme auch in vielen zivilen Bereichen eine große Bedeutung erlangt.

2.3.3 Anwendungsgebiete

Die Anwendungsgebiete des Radars sind sehr vielseitig. Es wurde primär zu militärtischen Zwecken entwickelt, wobei die Anwendung vor Allem in der Überwachung militärischer Objekte (Flugzeug, Schiffe, Raketen) oder zur Navigation von Raketen zu ihren Zielen liegt.
Zivil dient die Technik hauptsächlich der Navigation von Luft- und Wasserfahrzeugen. Besonders die Positionsbestimmung und die Kollisionsverhinderung spielen hierbei eine wichtige Rolle (z.B. zur Blindlandung von Flugzeugen, Überwachung von Flusseinfahrten für den Schiffsverkehr oder auch Ortung von Eisbergen).
Aber auch in anderen Bereichen wie z.B. bei der Wettervorhersage hat Radar eine große Bedeutung. Hierbei lassen sich Niederschlagsgebiete und Wolkenfronten detektieren. Beobachtungen über einen längeren Zeitraum geben Auskunft über das Bewegungsverhalten der Tiefdruckgebiete und ermöglichen auf dieser Grundlage Wettervorhersagen.
Radaruntersuchungen erlauben berührungslose Messungen, wodurch das Verfahren auch in der industriellen Messtechnik oder bei Geschwindigkeitsüberwachungen, z.B. bei Radaranlagen im Straßenverkehr eingesetzt wird. Auch der getestete Sportcomputer RDS II von Ciclosport arbeitet nach dem Prinzip der Relativgeschwindigkeitsmessung mittels Radar zwischen Personen und Umgebungen.

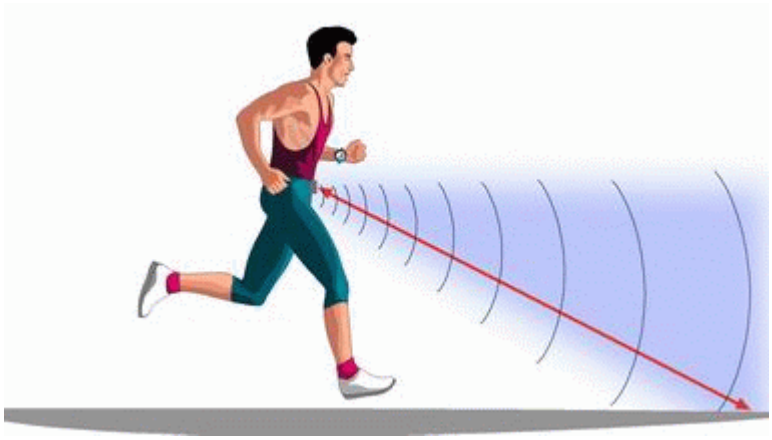


Abbildung 9: Radargeschwindigkeitsmessung (Funktionsprinzip RSS, Sonic Instruments)

Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist die Verwendung eines Radar-Bewegungsmelders, um z.B. beim Eintreten in den Erfassungsbereich des Bewegungsmelders Türen zu öffnen oder als automatische Lichtschalter zu dienen.
Im geodätischen, astronomischen und militärischen Bereich wird Radar für Fernerkundungszwecke (Abbildung 10) eingesetzt. Mit Hilfe von Radarbildern lassen sich viele Objektinformationen auch über große Entfernung hinweg gewinnen.

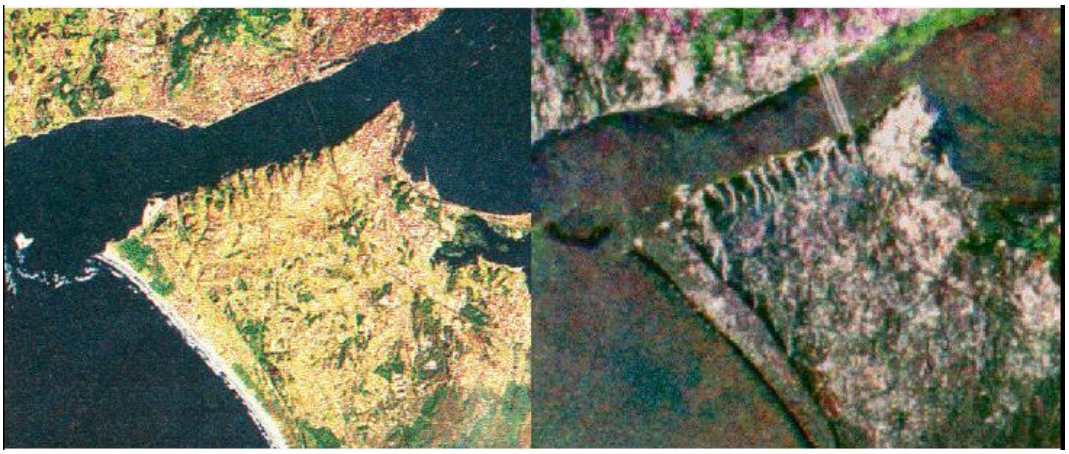


Abbildung 10: Radarfernerkundung (Lohmann, 2007)

So wurden einige Planeten wie die Venus anhand solcher Bilder kartiert. Da Radarstrahlung abhängig von der Wellenlänge und den Objekteigenschaften u.U. Objekte durchdringen bzw. in sie eindringen kann, lassen sich zusätzliche Informationen erhalten.

2.3.4 Funktionsprinzip

Die bisher beschriebenen Verfahren arbeiten alle mit aktiven Sendern, es handelt sich um sogenannte Primärradare. Daneben gibt es passive Systeme, z.B. an Flugzeugen, welche erst auf ein von einem Primärradar empfangenes Signal reagieren und darauf hin ein eigenes Signal aussenden. In dieser Antwort können weitere Informationen wie Flugzeugidentifizierungsnummern kodiert sein. Neben dem höheren Informationsgehalt

ist vor allem eine größere Reichweite bei gleichbleibender Sendeleistung von Vorteil, da die Mikrowellen die Distanz nicht doppelt zurücklegen müssen. Radargeräte lassen sich wie folgt einteilen:

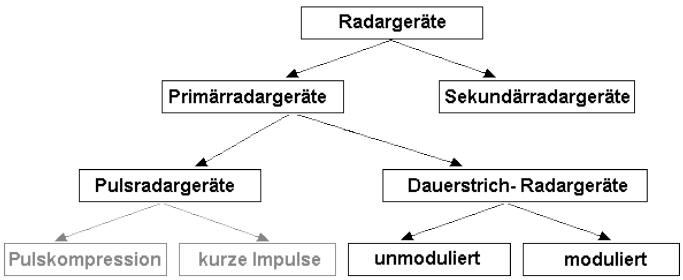


Abbildung 11: Einteilung von Radargeräten (Wikipedia "Radar", 2007)

Pulsradar

Vereinfacht dargestellt strahlt ein Sender über eine Richtantenne eine hochfrequente Energie, meistens kurze, stark gebündelte Wellenzüge (= Impulse, daher Pulsrader), in die gewünschte Richtung im Raum ab. Treffen die Wellen auf ein Objekt, werden sie je nach dessen Beschaffenheit (Material, geometrische Form) unterschiedlich stark reflektiert. Die zurückgeworfene Energie, das Echosignal, wird mit einem hochempfindlichen Empfänger wieder aufgenommen, verstärkt und verarbeitet.
Im Vergleich zur ausgesandten Energie ist das Echosignal deutlich schwächer, so dass zu dessen Wahrnehmung durch den Empfänger je nach Entfernung sehr starke Sender notwendig sind. Bei Distanzen von mehreren hundert Kilometern sind auf Grund der Dämpfung des Signals durch die Atmosphäre einige Megawatt erforderlich, wohingegen Geräte zur radarbasierten Geschwindigkeitsmessung von Fahrzeugen mit Messungen im direkten Nahbereich nur wenige Watt aufbringen müssen (siehe CW-Radar).
Bei den meisten Anwendungen befinden sich Sender und Empfänger in einem Gerät, es handelt sich dann um ein „monostatisches Gerät“. Ist das der Fall, so stellt ein geräteinternes Bauelement, der Duplexer, zwischen Senden und Empfangen um. Nach jedem ausgesandten Impuls befindet sich dann das Gerät für eine gewisse Zeit im Empfangsmodus, bevor es wieder zum Sender wird. Die Dauer des Empfangsmodus bestimmt die Reichweite des Radargerätes, denn nur während dieser Zeit kann das Echo eindeutig empfangen werden. Wird ein Echo von einem weit entfernten Ziel erst in der nächsten Empfangsepoche registriert, so entstehen Mehrdeutigkeiten und die genaue Entfernungsbestimmung wird erschwert. (Wolff, 2007)

Prinzipiell berechnet sich die Entfernung zum reflektierenden Objekt über folgende Formel:

$$R = \frac{c \cdot t}{2}$$

Formel 2-6

mit R = Entfernung

c = Lichtgeschwindigkeit (=300.000 km/s)

t = Impulslaufzeit

Durch Drehung der Antenne eines Pulsradars ergibt sich ein Rundsichtradar, was besonders zur Richtungsbestimmung geeignet ist. Die Impulse werden in bestimmte Richtungen ausgesandt. Die Orientierung der Antenne zum Empfangszeitpunkt des Echos beschreibt somit die Richtung zum erfassten Objekt.

CW-Radar

Neben den Pulsradaren gibt es auch Geräte, die ununterbrochen Mikrowellen konstanter Frequenz aussenden. Sie werden als Dauerstrich- oder CW-Radar bezeichnet, wobei CW für „continuous wave“ steht und soviel wie „Dauersender“ bedeutet. Solche Geräte sind für die Bestimmung von Geschwindigkeiten geeignet. Im Vergleich zu den Pulsradargeräten sind für die CW-Technik wesentlich geringere Sendeleistungen notwendig.
Die konstante Frequenz der vom nichtbewegten Sender ausgesandten elektromagnetischen Wellen wird beim Auftreffen auf ein bewegtes Objekt aufgrund des Dopplereffektes um einen gewissen Betrag verändert. Die reflektierten Wellen besitzen somit eine vom Referenzsignal abweichende Frequenz. Abbildung 12 verdeutlicht das Prinzip des Doppler-Effekts.

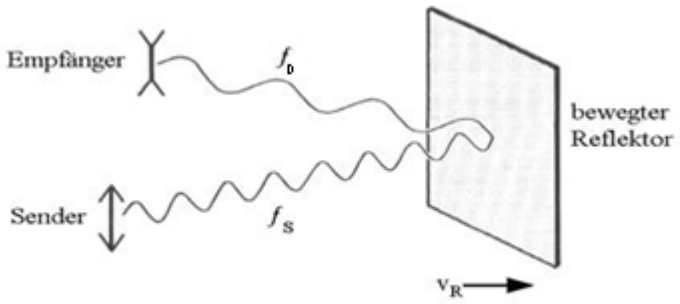


Abbildung 12: Doppler-Effekt (Alles über Radar, Laser, [...], 2006)

Werden die beiden Frequenzen miteinander verglichen, kann die Geschwindigkeit des Objekts bestimmt werden. Mit zunehmender Geschwindigkeit des Objektes nimmt auch die Dopplerfrequenzverschiebung zu. Diese physikalischen Gegebenheiten werden z.B. in Radaranlagen zur Geschwindigkeitsüberwachung im Straßenverkehr ausgenutzt.

Das Prinzip ist auch anwendbar, wenn sich sowohl der Sender als auch die reflektierende Oberfläche bewegen. In diesem Fall wird die Relativgeschwindigkeit des Senders zum

Objekt bestimmt. Bei nichtbewegter Umgebung mit unbewegten reflektierenden Objekten lässt sich die Absolutgeschwindigkeit des Senders feststellen (s. u.).

Die Dopplerfrequenzverschiebung berechnet sich mit der Formel:

$$f_D = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cdot \cos \alpha$$

Formel 2-7

mit f_D = Dopplerfrequenz

λ = Wellenlänge der gesendeten Frequenz f_S

v = Relativgeschwindigkeit

α = Winkel zwischen Sende- und Bewegungsrichtung

Aus dieser Formel sind sowohl λ als auch f_D bekannt, woraus sich v ermitteln lässt. V beschreibt dabei die Relativgeschwindigkeit zwischen Radargerät (Sender und Empfänger) und dem reflektierenden Objekt. Befindet sich eines dieser beiden Elemente in Ruhe, so ergibt sich die Absolutgeschwindigkeit des jeweils Anderen. Soll die Radialgeschwindigkeit (d.h. α=0°), also nur die Geschwindigkeit in Richtung Radargerät bzw. von diesem weg, ermittelt werden, so kann der Kosinus-Term entfallen, da er als Faktor 1 einfließt (cos(0°) = 1). Aus Formel 2-7 wird ebenfalls ersichtlich, dass Geschwindigkeitsmessungen zu Zielen rechtwinklig zur Senderichtung nicht möglich sind, da der Kosinus von 90° Null ist und somit keine Dopplerfrequenz mehr registriert werden kann.

Das RDS II der Sportartikelfirma Ciclosport arbeitet auf die gleiche Weise wie eine Radaranlage, nur dass in diesem Fall die Umgebung unbewegt bleibt und der Radarsender mit dem Sportler bewegt wird. Das Dopplerradarmodul von Innosent sendet eine CW-Mikrowelle im 24-GHz-ISM-Band bei 24,125 MHz aus und bestimmt anhand der Dopplerfrequenzverschiebung des Echos auf einfache Weise berührungslos die Geschwindigkeit des Sportlers bei verschiedenen Sportarten wie beim Laufen, Rad- oder Skifahren (Best, 2005).

Reine CW-Geräte können keine Entfernungen messen. Für diesen Zweck kam es zu einer Weiterentwicklung hin zu den sogenannten „FMCW-Radargeräten“ („frequency modulated continuous wave“, Moduliertes Dauerstrichradar). Nach einem bestimmten Muster ändert sich ständig die Frequenz des ausgehenden Signals, wodurch sich neben der Relativgeschwindigkeit auch die Entfernung zum Ziel bestimmen lässt. FM(CW)-Radargeräte kommen immer dann zum Einsatz, wenn die zu messenden Distanzen nicht allzu groß sind und es vor allem auf eine kontinuierliche Entfernungsmessung ankommt, da im Gegensatz zu den Pulsradaren ununterbrochen Messwerte geliefert werden. U.a. beruhen Abstandswarngeräte in Autos oder Flugzeug-Höhenmesser auf diesem Verfahren.

2.3.5 Frequenzbereiche

Für Radarmessungen kommen elektromagentische Wellen im Frequenzbereich von ca. 30 Megahertz bis zu ca. 98 Gigahertz (GHz) zum Einsatz. Manche Frequenzen werden dabei für spezielle Anwendungen bevorzugt, derzeit wird hauptsächlich der Bereich zwischen 1 GHz und 100 GHz verwendet. Die Wellenlängen liegen somit zwischen einem Zentimeter und einem Meter. Die folgende Grafik verdeutlicht, wo der verwendete Wellenbereich im Spektrum elektromagnetischer Wellen einzuordnen ist:

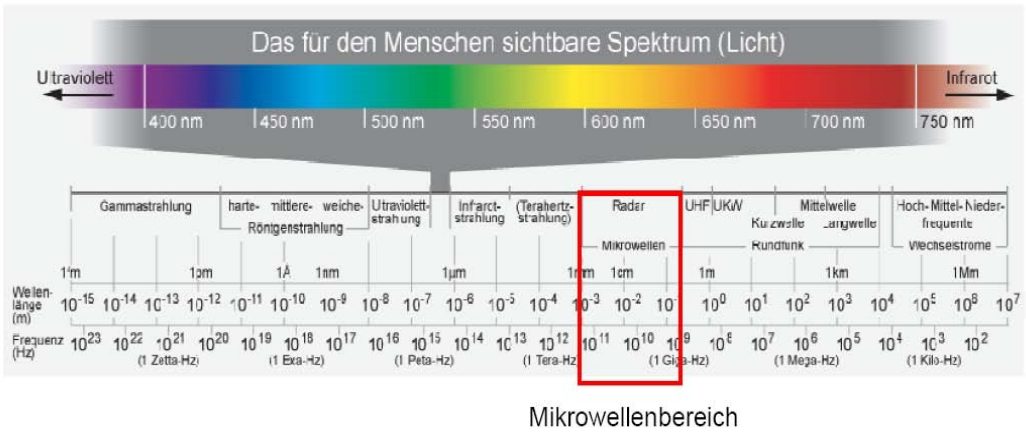


Abbildung 13: Frequenzbereich (Sörgel, 2006)

Abhängig von der Frequenz der Mikrowellen spricht man in der Radartechnik von verschiedenen Bändern. Historisch haben sich unterschiedliche Bezeichnungen entwickelt, weshalb eine einheitliche europäische Frequenzbandbezeichnung eingeführt wurde. Die jeweiligen (internationalen) Bezeichnungen sind der grünen Zeile der nachstehenden Grafik zu entnehmen:

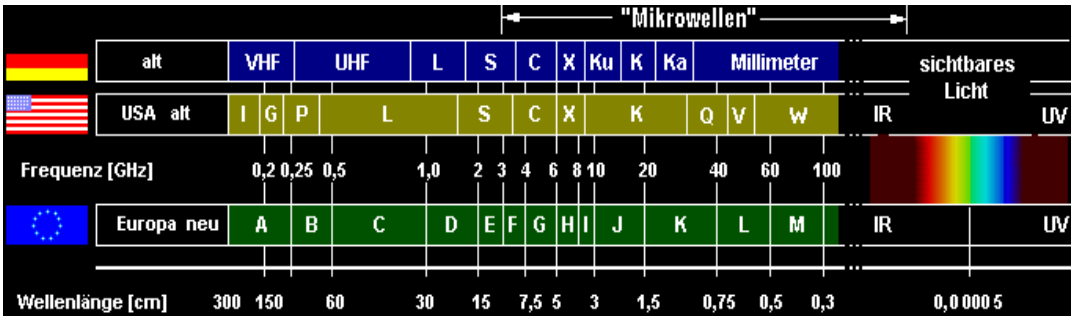


Abbildung 14: Frequenzbänder (Wolff, 2007)

2.3.6 Fehlereinflüsse

Wie bei allen auf hochfrequenten, elektromagnetischen Wellen basierenden Techniken ist das größte Problem das so genannte Rauschen, mit dem unspezifische Wellenaktivitäten beschrieben werden. Nahezu alle elektronischen Bauteile erzeugen

Rauschen, welches nur über die Verbesserung der Bauelemente und Schaltungen vermindert werden kann. Insbesondere in der Nähe von benachbarten Radar- oder Funkanlagen oder auch nahe Hochspannungsleitungen kann es dadurch zu Problemen in Form von nicht benötigten Informationen kommen.
Auch die Umgebung verursacht Rauschen. Speziell in Bodennähe kommt es zu sogenannten „Cluttersignalen“. Ständig werden kleine, falsch reflektierte oder an Objekten gestreute Echosignale (Clutter) empfangen, welche die eigentliche Radarwelle überlagern. Diese Interferenzen können mit dem Einsatz von Filtern zum großen Teil unter-drückt werden.
Einen weiteren negativen Einfluss auf die Radarwellen hat die Atmosphäre. Die von der Sendeantenne abgestrahlte Energie wird frequenzabhängig durch Regen, Nebel, Wolken und Schnee sowie turbulente Luftverhältnisse, Boden und Wasser in Erdoberflächennähe unterschiedlich stark gedämpft, gebrochen oder reflektiert. Speziell bei der Ortung werden durch die Brechung die Informationen über Zielrichtung und Entfernung verfälscht. Die Dämpfung bewirkt dabei eine Reichweitenverminderung des Radars, die an Grenzen unterschiedlicher Luftdichte hervorgerufene Brechung besonders im bodennahen Bereich ermöglicht hingegen Überreichweiten.

Bei den CW-Radaren hat hauptsächlich der Richtungswinkel vom Sender zum reflektierenden Objekt Einfluss auf die Genauigkeit. Wie bereits oben beschrieben, lässt sich auf Grund der Formel 2-7 für die Dopplerfrequenzverschiebung die Radialgeschwindigkeit am besten bestimmen, wohingegen eine Messung zu rechtwinkligen Zielen nicht möglich ist. Je größer der Winkel, umso schlechter lässt sich also die Objekt- bzw. Sendergeschwindigkeit ermitteln.

2.4 Beschleunigungssensoren

2.4.1 Einleitung

Im Vergleich zu den anderen bereits beschriebenen Messprinzipien ist die Technik der Beschleunigungssensoren ein noch recht junges Verfahren. In der Praxis kommen sie jedoch in verschiedenen Anwendungsbereichen immer häufiger zur Anwendung. Meistens handelt es sich dabei um Orientierungsproblematiken, d.h. die Feststellung der eigenen Lage gegenüber einem festen Raum. Ein Sensor kann Beschleunigungen feststellen, indem er die auf eine Prüfmasse wirkende Trägheitskraft registriert. Aus den Geschwindigkeitszunahmen und -abnahmen lassen sich Lageänderungen ableiten, eine doppelte Integration über die Zeit liefert die Wegstrecke in eine bestimmte Richtung.

2.4.2 Geschichtliche Entwicklung

Die Entwicklung der Beschleunigungssensoren zur Wegermittlung ist zunächst auf die einfachen Schrittzähler zurückzuführen. Folglich kann an dieser Stelle auf die geschichtliche Entwicklung des Fahrradcomputers (Abschnitt 2.2.2) verwiesen werden. Besonders die ersten Pedometer in Form von Bematisten zur Zeit Alexanders des Großen sind hier von Bedeutung, da diese speziell ausgebildeten Personen die Länge einer Strecke erstaunlich genau durch Zählen ihrer Schritte feststellen konnten und sich auf Grundlage dieses Prinzips die heutigen Schrittzähler entwickelt haben.
Im Laufe der Zeit wurden kleine, ebenfalls als Pedometer bezeichnete Geräte entwickelt, welche das Zählen anstelle des Menschen übernahmen. Sie werden meistens am Hosenbund befestigt und registrieren die zurückgelegten Schritte über die Anzahl der Erschütterungen. Nicht durch Gehen verursachte Erschütterungen werden fälschlicherweise ebenfalls als Schritt identifiziert, wodurch es z.B. durch Wippen zu Fehlzählungen kommen kann. Der große Nachteil einfacher Schrittzähler ist die recht hohe Ungenauigkeit der Wegstrecke, da für jeden Schritt eine konstante, am Anfang eingegebene Schrittlänge angenommen wird. Beim natürlichen Gehen oder Laufen variiert diese Größe hingegen aufgrund vieler Einflüsse wie Hindernissen, Bodenunebenheiten, Anstiegen oder Geschwindigkeitsänderungen.

Aus diesem Grunde setzen einige Sportcomputerhersteller heute Beschleunigungssensoren ein. Die ersten Sensoren bestanden aus einer empfindlichen („sensitiven“) Achse, auf welcher sich eine Prüfmasse den auftretenden Trägheitskräften bei Beschleunigung/Abbremsung entsprechend verschieben konnte. Bis Anfang der 1970er Jahre bildeten diese Sensoren kombiniert mit Kreiseln die grundlegende Methode der Inertialnavigation und vieler Steuerungsverfahren, danach wurden sie nach und nach gegen neuere und genauere Systeme mit magnetisch stabilisierten Massen oder biegsamen Quarz-Stäben ausgetauscht. Die ständige Weiterentwicklung im Bereich der Mikroelektronik erlaubte bald die Herstellung von miniaturisierten Sensoren, welche zum größten Teil auf piezoelektrischen Methoden beruhen, bei denen

dynamische Druckschwankungen über ein piezoelektrisches Sensorblättchen in elektrische Signale umgewandelt werden, oder als Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) aufgebaut sind. MEMS sind aus Silicium hergestellte Feder-Masse-Systeme, bei denen die von Beschleunigungen hervorgerufenen Auslenkungen der Masse an der Feder gegenüber einer Bezugselektrode eine Änderung der elektrischen Kapazität hervorruft, welche gemessen werden kann und auf die zugehörende Beschleunigung schließen lässt. Nach einem sehr ähnlichen Prinzip arbeiten in der Geodäsie sogenannte Gravimeter (Abbildung 16), wobei die Krafteinwirkung der Schwerkraft auf eine an einer Feder befestigten Prüfmasse festgestellt und daraus die Erdbeschleunigung selbst abgeleitet werden kann.

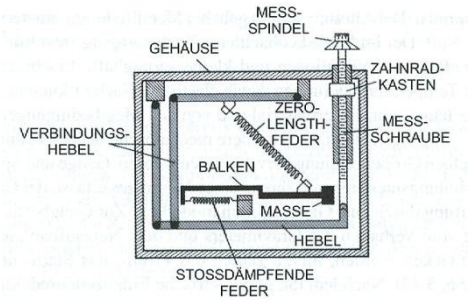


Abbildung 15: Prinzip eines (Relativ-)Gravimeters

(Torge, 2003)

Abbildung 16: Relativgravimeter

(Timmen, 2006)

Diese Art Beschleunigungssensoren kommen in vielen Gebieten der Technik zum Einsatz. Einige Anwendungsbeispiele sind die Airbag-Systeme im Auto, die Seismik (Erdbebenvorhersage), in Zusammenarbeit mit Gyroskopen (Kreisel) die Stabilisierung und Lageregelung von Hubschraubern sowie neuerdings die Steuerung von Videospielen.

2.4.3 Funktionsprinzip

Solcher kleinen Systeme bedienen sich auch die Beschleunigungssensoren für die Streckenermittlung beim Laufen. Dabei gibt es zwei grundlegende, ähnlich arbeitende Systeme: zum einen der von Dynastream entwickelte Chip SpeedMax für einen Foot Pod, der von den Firmen Polar (S1, getestet) und Suunto (T6, nicht getestet) verwendet wird, und zum anderen das von Nike angebotene iPod Sport Kit (ebenfalls nicht getestet). Bei beiden Varianten ermitteln die Akzelerometer jede einzelne Schrittlänge individuell, wodurch im Vergleich zu den einfachen Schrittzählern mit fest vorgegebener Schrittlänge insbesondere auch bei variierenden Schrittlängen eine hohe Geschwindigkeits- und Streckenmessgenauigkeit ermöglicht werden soll.
Der Vorteil der Sensortechnik ist die Unabhängigkeit des Laufortes, so können Geschwindigkeiten und Strecken im Gegensatz zu GPS-gestützten Verfahren auch im

Gebäudeinneren oder im Freien bei GPS-kritischen Situationen wie Sichtbehinderungen durch Häuserschluchten oder in Wäldern verwendet werden.

Beide Varianten machen sich den zyklisch wiederholenden Bewegungsablauf des Fußes beim Gehen/Laufen zu Nutze. „Bei der Gangbewegung wird der Rumpf abwechselnd von einem Bein getragen (Standbein), während das andere Bein am ersten vorbeischwingt (Schwingbein oder Spielbein)“ (Benninghoff & Goerttler, 1978). Das Gehen lässt sich somit in zwei Hauptphasen einteilen: Die Standphase (stance phase), während der sich der Fuß auf dem Boden befindet und belastet wird und die Schwingphase (swing phase), welche die Bewegung des Fußes durch die Luft bezeichnet (Rose & Gamble, 1994). Der menschliche Bewegungsablauf beim Gehen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

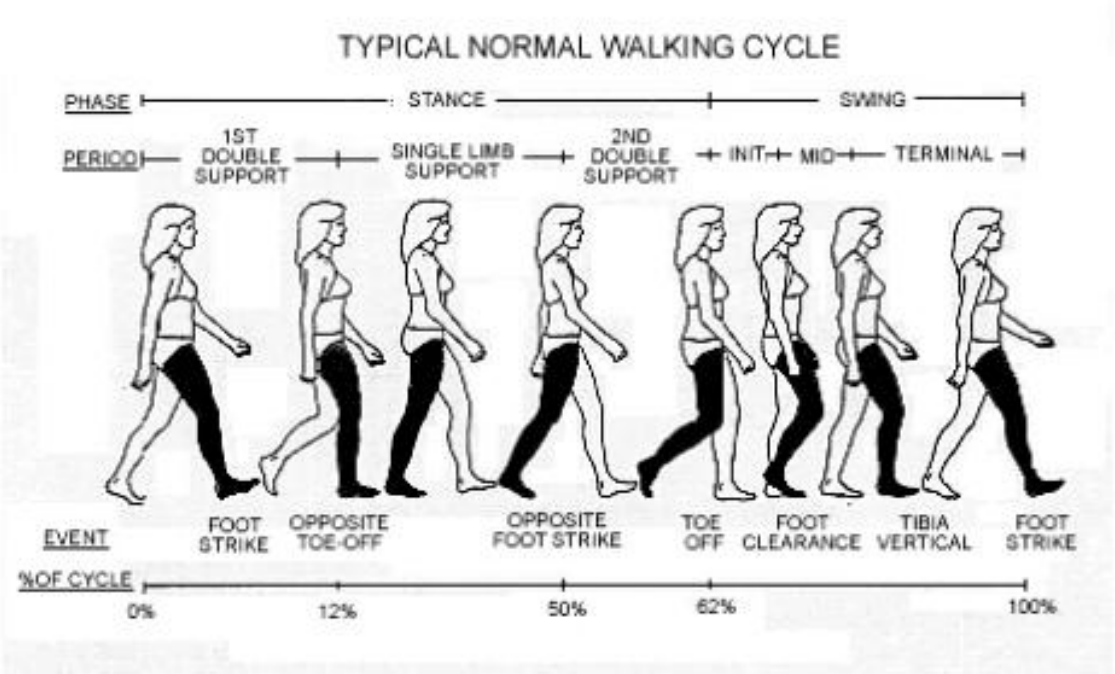


Abbildung 17: Typischer Bewegungsablauf beim Gehen (Rose & Gamble, 1994)

Im Verlauf eines Schrittablaufes ist der Fuß ständig positiven und negativen Beschleunigungen ausgesetzt, welche nach einem typischen Verhaltensmuster auftreten und bei unterschiedlichen Personen kaum voneinander abweichen (Stirling R. G., 2004).

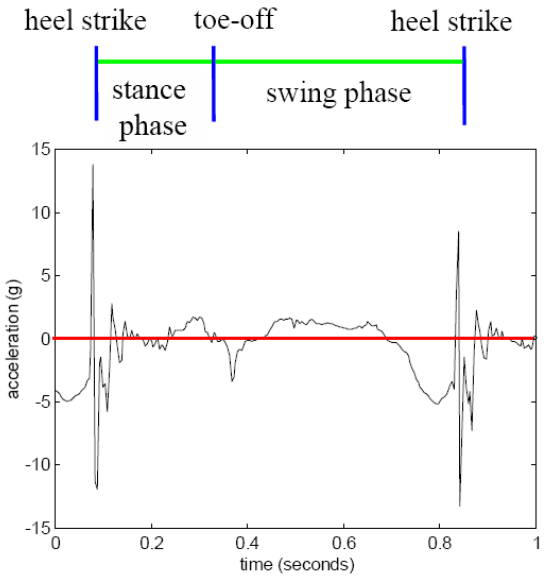


Abbildung 18: Beschleunigungen des Fußes (SpeedMax White Paper)

Eine weitere Auffälligkeit ist der hohe Grad an Korrelation zwischen Schrittfrequenz und Schrittlänge. So werden beim Gehen eher kurze Schrittweiten erzielt und der Fuß wird nicht sehr hoch angehoben. Beim Laufen hingegen wird der Fuß durch den erhöhten Schwung weiter nach oben bewegt und die Schrittlängen fallen wesentlich größer aus, wie in folgender, auf Testergebnissen mit dem SpeedMax-Sensor von Dynastream beruhender Grafik zu sehen ist.

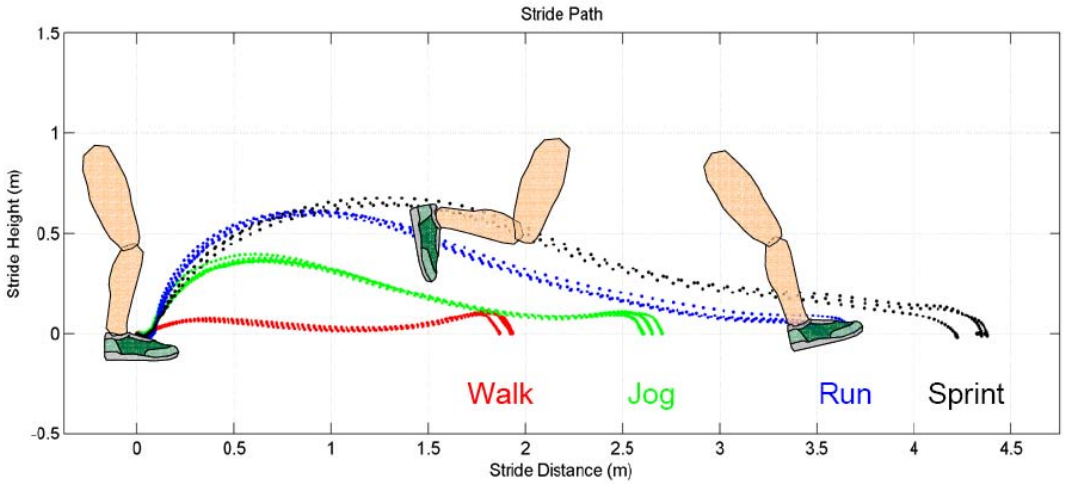


Abbildung 19: Abhängigkeit von Schrittlänge und Schrittfrequenz (SpeedMax White Paper)

Die Schrittlänge hängt also zu einem großen Teil von der Zeit ab, die sich der Fuß in der Luft befindet. Unter der Annahme, dass sich der Mensch während eines Schrittes genau um eine Schrittlänge weiterbewegt und diese variieren kann, muss für ein optimales Ergebnis der zurückgelegten Gesamtdistanz beim Laufen jede Schrittweite einzeln ermittelt werden.

Der bereits erwähnte Sensor SpeedMax der Firma Dynastream wird in einem Foot Pod auf dem Schuh befestigt und misst während des Laufens mehr als 1000 Mal pro Sekunde die auf den Fuß wirkenden Beschleunigungen, um somit zu jeden Zeitpunkt die Position

des Foot Pods in Bezug auf den festen Raum zu ermitteln. Die auftretenden Beschleunigungen werden dabei mittels zweier Sensoren in Vertikal- und Horizontalrichtung erfasst, da sich der Fußwinkel beim Laufen ständig ändert und so eine genauere Aussage über die tatsächliche Vorwärtsbeschleunigung getroffen werden kann. Anhand der Beschleunigungen lässt sich die jeweilige Phase des Fußes feststellen, wodurch Informationen über die Schrittdauer, welche die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Standphasen beschreibt, erhalten werden. Die Vorwärtsgeschwindigkeit in der Sagittalebene[3] während eines einzelnen Schrittes wird über einen Algorithmus mittels Integration über die Zeit (Schrittdauer) errechnet

$$(Beschleunigung \times Zeit = Geschwindigkeit),$$

eine nochmalige Integration über die Zeit liefert die Schrittweite

$$(Geschwindigkeit \times Zeit = Strecke).$$

Eine Summation der einzelnen Schrittweiten führt schließlich zur insgesamt zurückgelegten Distanz während eines Laufes. Über Funk werden die Ergebnisse an die Sportuhr übertragen, welche die Daten anzeigt und speichert.

Eine ähnliche Methode zur Schrittlängenermittlung wendet das iPod Sport Kit von Nike an. Der Sensor wird nicht wie der SpeedMax-Chip auf dem Schuh befestigt, sondern unter der Einlegesohle direkt im Nike-Schuh an einer extra dafür vorgesehenen Stelle platziert. Mit einem Adapter ist auch die Anwendung mit Schuhen anderer Hersteller möglich, wobei der Sensor mit Hilfe des Adapters dann wieder auf dem Schuh befestigt wird.

„Ein empfindlicher piezoelektrischer Beschleunigungsmesser misst die Zeit, die Ihr Fuß beim Gehen oder Laufen auf dem Boden verbringt. Diese Kontaktzeit steht im direkten Verhältnis zu Ihrer Geschwindigkeit“ (Nike + iPod Frequently Asked Questions (Technical), 2007). Wie bereits beschrieben, hängt die Schrittlänge stark mit der Schrittfrequenz zusammen. Beim Laufen ist die Standphase des Fußes wesentlich kürzer als z.B. beim Gehen. Die zeitliche Abfolge und die Verweildauer des Standfußes auf dem Boden ermöglichen also Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit, mit der ein Schritt durchgeführt wurde. Anhand der Geschwindigkeit lassen sich dann wieder zunächst die Schrittlänge und dann die Gesamtstrecke feststellen. Im Gegensatz zum SpeedMax scheint das Sport Kit nur einen Beschleunigungsmesser zu besitzen (Nike + iPod Frequently Asked Questions (Technical), 2007), welcher somit nur die Beschleunigungen in eine Richtung ermitteln kann. Der Sensor wird hierbei also nicht dazu eingesetzt, den kompletten Bewegungsablauf eines Fußes beim Laufen möglichst genau zu modellieren, sondern eher um die Standphasen (Dauer und Frequenz) des Fußes zu detektieren.

Die ermittelten Daten werden ständig kabellos über ein 2,4 GHz Radioprotokoll an den iPod nano gesendet und können dort dem Benutzer angezeigt werden.

[3] vertikal von hinten nach vorne durch unseren Körper verlaufende Ebene

2.4.4 Fehlereinflüsse

Beide beschriebenen Verfahren ermitteln die Distanz über zeitliche Integration, welche eine ungünstige Fehlerfortpflanzung mit sich bringt. Dementsprechend wirkt sich ein Fehler in der ermittelten Schrittlänge auf die Gesamtdistanz proportional zur Anzahl der durchgeführten Schritte aus (Stirling, Fyfe, & Lachapelle, 2005).
Es ist folglich für ein präzises Ergebnis notwendig, dass die einzelnen Schrittlängen möglichst genau festgestellt werden.
Der Fuß bewegt sich für gewöhnlich in der Schwingphase des Laufens nicht exakt nach vorne in Laufrichtung, sondern beschreibt zusätzlich Bewegungen zur Seite. Diese Bewegungen sind vom individuellen Laufstil des Nutzers abhängig und können vom SpeedMax nicht korrekt erfasst werden, da eine Beschleunigungsmessung quer zur Laufrichtung nicht erfolgt. Eine exakte Modellierung der Seitenbewegung ist hier somit nicht möglich, was zu kleinen Ungenauigkeiten bei der Schrittlängenermittlung führt.
Um diesem Fehler entgegenzuwirken, lässt sich der Foot Pod über eine Kalibrierung an den eigenen Laufstil anpassen. Hierzu wird eine Strecke bekannter Länge (z.B. auf der 400 Meter Laufbahn um einen Sportplatz) gelaufen und anschließend ermittelt das Gerät einen Kalibrierungsfaktor aus dem Verhältnis der angezeigten Strecke zur Sollstreckenlänge. Die Kalibrierungskonstante wird dann als Maßstabsfaktor auf die vom Foot Pod ermittelten Strecken angebracht, um Fehler durch den individuellen Laufstil möglichst gering zu halten. Nach (SpeedMax White Paper) beträgt die Genauigkeit der Distanzermittlung ungefähr 97% unkalibriert und nach erfolgter Kalibrierung ca. 99%.
Allerdings bezieht sich der so erhaltene Kalibrierungsfaktor nur auf die tatsächlich gelaufene Geschwindigkeit während des Kalibrierungslaufes. Weichen bei späteren Läufen die Geschwindigkeiten von ihr ab, so müsste theoretisch ein anderer Faktor angebracht werden, um für jede Bewegungsart wie Gehen, Joggen, Laufen, Sprinten usw. eine Anpassung an den individuellen Stil zu erhalten. Um dem Nutzer nicht so viele Kalibrierungsläufe zumuten zu müssen, werden diese geringen Ungenauigkeiten hingenommen bzw. es steht ihm selbst frei, Kalibrierungen vor jedem Lauf mit anderer Geschwindigkeit durchzuführen. Das bestmögliche Ergebnis lässt sich erzielen, wenn der Laufstil während des Kalibrierungslaufes exakt mit dem des späteren (Trainings-)Laufes - auch in Bezug auf die Geschwindigkeit -übereinstimmt. Des Weiteren ist anzumerken, dass die Position des Foot Pods auf dem Schuh nach der Kalibrierung nicht verändert werden soll, da dadurch ebenfalls wieder die Kalibrierungskonstante geändert werden müsste. Eine Drehung des Foot Pods auf dem Schuh z.B. bewirkt, dass die Beschleunigungen nicht mehr in Sagittalrichtung ermittelt werden, sondern etwas schräg versetzt zur Laufrichtung. Demzufolge passen die tatsächlichen Beschleunigungen während eines Schrittes nicht mehr so gut zu den mathematischen Modellen, auf welchen der Algorithmus beruht, und es kommt zu systematisch verfälschten Schrittlängen, die sich weitestgehend über einen Kalibrierungsfaktor korrigieren lassen.
Auch das Sport Kit von Nike ermöglicht eine Kalibrierung, um den Sensor an den eigenen Laufstil anzupassen. Die Verwendung von nur einem Beschleunigungsmesser führt mit hoher Wahrscheinlichkeit dazu, dass die Schrittlänge weniger exakt ermittelt werden kann, da nur eine Beschleunigungsrichtung erfassbar ist. Leider konnte diese These nicht in der Praxis untersucht werden, da Gerät für einen Test nicht zur Verfügung stand.

2.5 Barometrische Höhenmessung

2.5.1 Einleitung

Die barometrische Höhenmessung beruht auf der funktionalen Beziehung zwischen Höhe und Luftdruck. Ändert sich der Druck um 1 hPa, so kann eine Höhenänderung von 10 m angenommen werden. Dieses Verfahren zur Höhenbestimmung ist jedoch ungenauer als beispielsweise das klassische Nivellement, da hier nur Genauigkeiten im Dezimeterbereich erreicht werden können. Hierzu ist allerdings eine sehr präzise Erfassung des Luftdrucks auf 1/100 hPa notwendig. Die genutzten Messgeräte nennt man Altimeter. Es handelt sich dabei um Barometer, die statt des Luftdrucks die Höhe anzeigen. Sie kommen häufig beim Wandern, Bergsteigen oder auch bei Sportuhren zum Einsatz.

2.5.2 Physikalische Grundlagen

Der Luftdruck ist physikalisch wie folgt definiert:

$$p = \frac{F[N]}{A[m^2]}$$

Formel 2-8: Luftdruck

Man unterscheidet zwischen Absolutdruck (bezogen auf absolut Null) und Differenzdruck, der den Druckunterschied zu einem Referenzdruck beschreibt. Beide Messwerte werden heute in Pa (bzw. hPa) angegeben, wobei gilt: 1 Pa = 1 N/m². Die Angaben können auch in bar (bzw. mbar) gemacht werden. Hier lautet die Beziehung zu Pa wie folgt:

1 Pa = 0,01 hPa = 0,01 mbar = 0,00001 bar

Da der Luftdruck nicht nur von der Höhe, sondern auch von Lufttemperatur, geographischer Breite und in geringem Ausmaß auch von der Luftfeuchtigkeit abhängig ist, werden zur barometrischen Höhenmessung ausschließlich Druckunterschiede gemessen. Hierbei können eben genannte sonstige Einflüsse eher vernachlässigt werden und die reine Höhe aus den Luftdruckänderungen bestimmt werden.

2.5.3 Barometer

Bei den Barometern gibt es zwei verschiedene Typen: Flüssigkeits- und Dosenbarometer. Flüssigkeitsbarometer unterscheidet man in Heberbarometer und Gefäßheberbarometer.

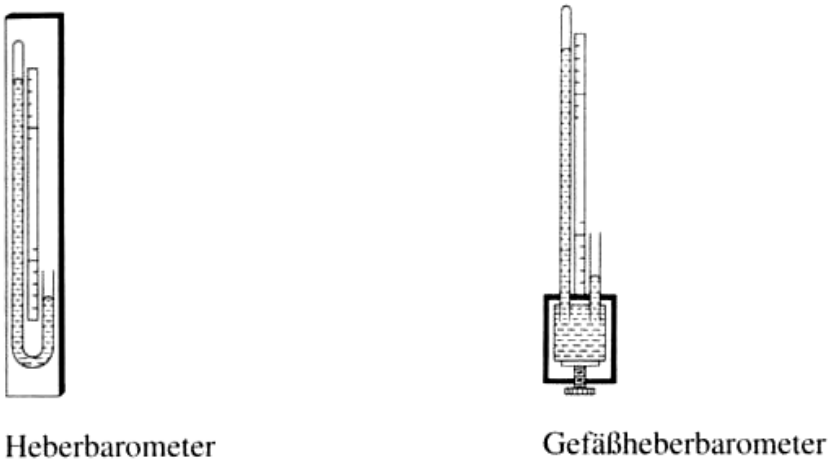


Abbildung 20: Flüssigkeitsbarometer (Kahmen, 1997)

Die Heberbarometer bestehen aus einem Glasrohr, was an einem Ende geschlossen und am anderen Ende U-förmig gebogen und nach oben hin offen ist (siehe Abbildung 20). Das Quecksilber (Hg) wird in das luftleere Glasrohr eingefüllt und durch den Druck, der auf die Flüssigkeit wirkt in einen bestimmten Höhenzustand gebracht. Dieser Quecksilberstand kann an beiden Enden abgelesen und daraus die Differenz gebildet werden. Dabei gibt es die Möglichkeiten, einen festen Maßstab oder einen verschiebbaren Maßstab zum Ablesen zu nutzen. Die verschiebbare Skala kann an einem Ende auf den Nullpunkt gebracht werden, so dass eine Differenzbildung wegfällt.

Gefäßheberbarometer funktionieren vom Prinzip her genauso. Der untere Teil des Barometers wird jedoch durch ein Gefäß mit beweglichem Boden ersetzt. Die Ablesungen lassen sich nun an verschiedenen Stellen durchführen und die Differenzen mitteln, was zu einem exakteren Ergebnis führt. Dies wird durch den beweglichen Boden realisiert, der den Füllstand beider Seiten um den gleichen Betrag hebt bzw. senkt. Bei Temperaturänderungen oder einer anderen Schwerebeschleunigung müssen weitere Korrekturen angebracht werden, was bei einer Messung im Feld meist der Fall ist. Dadurch eignen sich Flüssigkeitsbarometer für derartige Einsätze eher weniger, werden jedoch im Labor als sogenannte Normalbarometer zur Überprüfung von Dosenbarometern eingesetzt.

Dosenbarometer bzw. Barometer mit Membrandose (Aneroidbarometer) besitzen eine luftleere Kapsel, deren Deckel aus einer dünnen gewellten Membran besteht. Diese würde durch den Luftdruck zusammengedrückt werden, was eine starke Feder, deren Spannkraft etwa dem Luftdruck entspricht, verhindert. Die Membran hebt und senkt

sich aber weiterhin innerhalb des Messbereichs proportional zu den Änderungen des Luftdrucks.

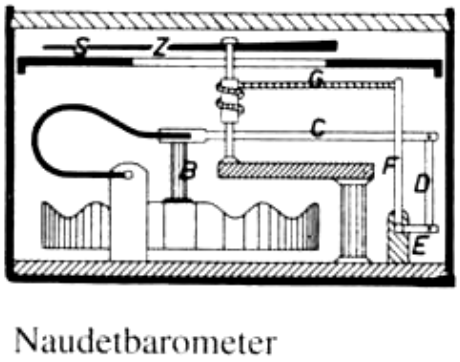


Abbildung 21: Membrandosenbarometer (Kahmen, 1997)

Typisches Barometer mit Membrandose ist das Naudetbarometer, welches die Bewegungen der Membran über eine Hebelverbindung (siehe Abbildung 21) misst. Da der Ausdehnungskoeffizient der Metallteile des Barometers temperaturabhängig ist, wird hier ein Innenthermometer genutzt, um den Einfluss der Temperatur sofort zu eliminieren. Derartige Barometer bezeichnet man als Kompensationsbarometer. Die Verformungen der Membrandose müssen für hohe Genauigkeiten sehr exakt gemessen werden. Dazu werden diese Verformungen wie beim Naudetbarometer in analoge elektrische Messgrößen umgewandelt. Hierfür verwendet werden piezoresistive, kapazitive Druckaufnehmer oder Vibrationsdruckaufnehmer (Kahmen, 1997). Anschließend besteht die Möglichkeit, die Daten über einen Analog/Digital (A/D)-Wandler zur digitalen Weiterverarbeitung bereitzustellen.

Ein Altimeter unterscheidet sich hauptsächlich in einem Punkt von einem Barometer: Statt Luftdruckdifferenzen werden Höhenunterschiede, auf eine Ausgangshöhe bezogen, angezeigt.

2.5.4 Genauigkeit

Aus der Barometerformel von W. Jordan können Höhenunterschiede unter Beachtung aller Fehlereinflüsse berechnet werden:

$$\Delta H = 184001 g \frac{B_1}{B_2}(1 + \alpha t_m)\left(1 + 0{,}377\frac{e_m}{p_m}\right) \cdot (1 + \beta cos 2\varphi_m)\left(1 + \frac{2H_m}{r}\right)$$

Formel 2-9: Barometerformel von W.Jordan

Darin enthalten sind die Schwerebeschleunigung g, Druckmessungen auf zwei Stationen B_1,B_2, die Temperatur t_m, der Dampfdruck e_m, der Luftdruck p_m, die geographische Breite φ_m sowie die Höhe H_m. Durch Fehlerfortpflanzung dieser Formel kann untersucht werden, welche Messgröße den größten Einfluss auf die Genauigkeit hat. Daraus resultiert, dass die Hauptfehlerquelle bei größeren Höhenunterschieden durch die Unsicherheit der Temperaturerfassung zustande kommt, während bei kleinen Höhenänderungen die Ablesegenauigkeit für Verschlechterungen der Gesamtgenauigkeit verantwortlich ist. Bei einer Unsicherheit der Temperaturerfassung von 1° C (was relativ hoch angesetzt ist) und einer realistischen Genauigkeit der Ablesungen von 0,05 bis 0,1 mbar, können bei Höhenunterschieden bis 200 m Genauigkeiten von $\pm$ 1 m erreicht werden. (Kahmen, 1997)

3. Allgemeine Grundlagen zu den Tests

3.1 Erläuterungen zum Begriff Genauigkeit

In dieser Arbeit soll die Messgenauigkeit von Sportuhren mit Geschwindigkeits- und Entfernungsfunktion untersucht werden. Dafür ist zunächst die Bedeutung des Wortes „Genauigkeit“ zu klären.
Anhand der Genauigkeit lässt sich angeben, wie präzise Messungsergebnisse bestimmt werden können. „Völlig fehlerfreie Messungen sind infolge der Mängel der Messgeräte und der Unvollkommenheit der menschlichen Sinne nicht möglich. Die Messungen werden daher in der Regel mehrere Male wiederholt […]“ (Kahmen, 1997).
Messfehler werden je nach der Art ihrer Entstehung in drei Kategorien eingeteilt:

- Grobe Fehler
- Systematische Fehler
- Zufällige Fehler

Grobe Fehler entstehen durch Nachlässigkeiten während der Messung. Von Instrumenten falsch abgelesene Werte, Zahlendreher usw. gehören zu dieser Gruppe, welche sich durch Kontrollmessungen aufdecken und eliminieren lässt.
Wenn das Messergebnis durch Einflüsse verfälscht wird, welche stets in demselben Sinne wirken, handelt es sich um systematische Fehler. Sie können bei einseitiger Handhabung, unkorrekter Eichung oder durch äußere Einflüsse wie einseitig auf das Messinstrument wirkende atmosphärische Effekte (Temperaturänderung, Luftdruck, usw.) hervorgerufen werden. Bei einer Sportuhr mit barometrischer Höhenmessung (Abschnitt 2.5) resultiert trotz unveränderter Position aus einer Luftdruckveränderung eine Höhenvariation. Abhilfe schafft in diesem Fall eine Eichung, ein anderes Messverfahren (z.B. Höhe über GPS bestimmen, falls verfügbar) oder eine rechnerische Berücksichtigung bzw. Korrektion.
Problematischer verhält es sich mit den sog. zufälligen Fehlern. Werden von einem Messergebnis die groben und systematischen Fehleranteile abgezogen, so bleiben laut (Kahmen, 1997) „unbekannte Elementarfehler“ über, welche aufgrund ihres wahllosen Auftretens als zufällige Fehler bezeichnet werden. Im Zusammenhang mit Sportuhren werden diese Fehler hauptsächlich durch die Unvollkommenheit der Messinstrumente und durch unkontrollierbare Veränderungen der äußeren Umstände verursacht. Im statistischen Sinne handelt es sich bei diesem Fehleranteil um stochastisch unabhängige Veränderliche, welche den Gesetzen des Zufalls unterliegen und sich auf die Messergebnisse genau so oft mit positiven und negativen Vorzeichen auswirken.
Genügend große Messreihen, welche hauptsächlich zufällige Fehler aufweisen, folgen der von C.F. Gauß entdeckten Normalverteilung. Diese spezielle Verteilungsfunktion

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}}$$

Formel 3-1

kann, wie in Abbildung 22 leicht zu erkennen ist, mit den beiden Variablen Erwartungswert μ und der Standardabweichung σ vollständig beschrieben werden.

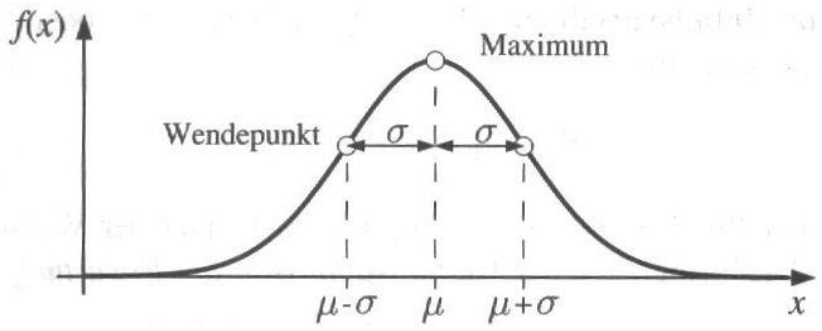


Abbildung 22: Normalverteilung (Niemeier, 2002)

Der Erwartungswert ist ein Begriff aus der Stochastik und beschreibt den Wert einer Zufallsvariablen, der sich bei mehrmaligem Wiederholen des zugrunde liegenden Experiments als Mittelwert ergibt. Die Standardabweichung einer Messreihe berechnet sich wie folgt:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

Formel 3-2

mit n = Anzahl der Werte (Stichprobenumfang)

x_i = Merkmalsausprägung des i-ten Elements der Stichprobe

$\bar{x}$ = Mittelwert der Stichprobe $\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i)$

Die Größe der Standardabweichung stellt die Streuung der Messergebnisse dar und definiert somit die Breite der Kurve. Aus diesem Grund sind möglichst kleine Standardabweichungen zu bevorzugen, um ein genau bestimmtes Ergebnis zu erhalten. Folglich ist die Standardabweichung einer Messreihe ein geeignetes Maß für die erlangte Genauigkeit des Erwartungswertes.

Die Entfernungsgenauigkeit bei Sportuhren wird zudem häufig in Prozent angegeben. So bedeutet beispielweise eine Angabe von 95%-Genauigkeit, dass auf die absolut gesehene Strecke mit einer Abweichung von 5% zu rechnen ist. Bei einer 1000 Meter langen Distanz wäre also von einem Fehler mit ± 50 m auszugehen. Das Genauigkeitsniveau ist dabei nicht als fest anzusehen, denn es wird üblicherweise aus vielen Einzelmessungen bestimmt. Die Fehler können also auch kleiner oder größer sein, es handelt sich nur um eine durchschnittliche Aussage.

Bei den Tests wurden die Messungen mindestens 4-mal durchgeführt, um die Ergebnisse gegen die verschiedenen Fehlerarten abzusichern. Traten bei einer Versuchsdurchführung häufig unterschiedliche Werte auf, so wurden zusätzliche Messungen vorgenommen.

3.2 Genauigkeitsanforderungen an die Geräte

Bei den getesteten Geräten handelt es sich überwiegend um Sportcomputer der gehobenen Preisklasse, welche wohl besonders für ambitionierte Hobby- und Leistungssportler interessant sein dürften. Dementsprechend wird von den Geräten eine hohe Strecken- und Distanzmessgenauigkeit erwartet. Dabei ist zwischen den verschiedenen Messprinzipien zu unterscheiden.

GPS

Unter optimalen Bedingungen lassen sich bei GPS-Messungen Strecken mit einer Genauigkeit von durchschnittlich > 99 % bestimmen. Die hohe Präzision wird dabei durch die kurzen Abstände zwischen den Positionierungen erreicht. Die zurückgelegten Distanzen werden hauptsächlich auf Grundlage relativer Daten berechnet, wobei die ausbreitungsspezifischen Fehler (Abschnitt 2.1.5) keine Auswirkung mit sich bringen und folglich die dadurch hervorgerufenen, negativen Effekte unterdrückt werden können.
Geht man von einer zu 99 % genau bestimmten 500 m langen Strecke aus, so sollte die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung bei 10 km/h etwa 0,1 km/h (= 0,03 m/s) betragen.
Bei absoluten Positionsbestimmung soll nach (kowoma, 2007) eine Genauigkeit von < 15 m erreicht werden. Haben die GPS-Geräte die Möglichkeit, EGNOS-Korrekturdaten zu empfangen, so lässt sich die Positionierung auf < 3 m verbessern.

Fahrradcomputer

Über Fahrradsensoren lassen sich Geschwindigkeiten und Distanzen sehr genau ermitteln. Das Messprinzip beruht dabei auf der Zählung von Impulsen, welche durch einen am drehenden Rad befestigten Magneten induziert werden. Die beiden Parameter lassen sich ableiten, wenn der entsprechende Radumfang bekannt ist. Einzige variable Größe ist somit der Reifenumfang. Die erzielbare Präzision ist folglich (neben vernachlässigbar kleinen, anderen Fehlern) direkt von der Genauigkeit der Umfangbestimmung abhängig. Wie das Rechenbeispiel in Abschnitt 20 verdeutlicht, macht ein um 5 mm zu groß bestimmter Radumfang (2075 mm) bei einer tatsächlichen Größe von 2070 mm einen Fehler von 0,24 % aus. Dies entspricht bei einer 50 km langen Strecke einer Abweichung von 120 m. In Bezug auf die Geschwindigkeit ist die Auswirkung des Fehlers noch geringer. Bei einer Fahrt mit 35 km/h ergibt sich eine scheinbare Geschwindigkeit von 35,0875 km/h. Die Abweichung ist somit < 0,1 km/h.
Das Beispiel bezieht sich auf nur auf die angegebenen Zahlenwerte. Dabei muss das Verhältnis zwischen Fehler und Radumfang beachtet werden. Wird die Umfangsbestimmung mehrmals mittels Abrollmethode vorgenommen, so lassen sich Genauigkeiten > 99 % erzielen.

Radar

Eine Genauigkeitsaussage über Radar-basierte Verfahren lässt sich an dieser Stelle schlecht treffen. Beim RDS von Ciclosport sei auf die Herstellerangaben von (in der

Regel) 99 % verwiesen. Dieser Wert bezieht sich auf ein kalibriertes Gerät. In den Tests lassen sich also Genauigkeiten in dieser Größenordnung erwarten.

Beschleunigungssensoren

Wie bereits beim Radar ist es auch bei den Beschleunigungssensoren kompliziert, Genauigkeitsaussagen zu treffen. Die erzielbare Präzision ist abhängig von der Messgenauigkeit der Akzelerometer und des mathematischen Modells zur Rekonstruktion der Schrittlängen. Unter konstanten Bedingungen ergeben sich laut Polar für den Laufsensor S1 mit der Sportuhr S625X Abweichungen von ± 3 % der Sollstrecke. Wird das Gerät kalibriert, so lassen sich noch genauere Ergebnisse erzielen.

Barometrische Höhenmessung

Bei barometrischen Höhenmessungen werden relative Höhenunterschiede über Luftdruck- und Temperaturveränderungen ermittelt. Folglich sind die Registriergenauigkeiten dieser beiden Sensoren von Bedeutung. Die Benutzung aktueller Technik sollte die Messung von Temperaturen auf 0,2° und des Luftdrucks auf 0,5 mbar erlauben. Dies entspricht einer Genauigkeit von < 2 m bei relativen Höhen.

3.3 Beschreibung der Teststrecken

Strecke in nördliche Richtung

Diese Teststrecke dient als Referenzstrecke für alle Geräte und Messungen. Sie befindet sich östlich des EXPO-Geländes direkt auf der Verbindungsstraße zwischen Hannover-Laatzen und Hannover-Wülferode. Durch den festen Untergrund werden vor allem in Bezug auf Reflexionseigenschaften (Radar) oder auch Laufstil (Beschleunigungssensor) die Referenzbedingungen für diese Geräte erreicht. Auch ein uneingeschränkter Empfang von GPS-Signalen ist hier möglich, da es an keiner Stelle der Strecke zu Abschattungen kommt. Der fast ebene Streckenverlauf (nur 1,17 m Höhenunterschied über die ganze Länge) ermöglicht eine sehr gleichmäßige Geschwindigkeit und die Überprüfung der Höhenvariationen über die komplette Länge von 500m. Mögliche Unsicherheiten, die vor allem durch Kurven zustande kommen, werden aufgrund des geraden Verlaufs ausgeschlossen. Zudem kann eine Überprüfung der Querabweichung von dieser Strecke durchgeführt werden.

Strecke in südliche Richtung

Dadurch können weitere Aussagen über die Genauigkeit der Geräte mit GPS-Funktion getroffen werden. Ein weiteres wichtiges Kriterium optimaler Bedingungen ist das Wetter. Die Tests fanden aus diesem Grund bei klarem, sonnigem Himmel und trockenem Untergrund statt.

Länge:	500 m
Verlauf:	gerade
Steigung:	kaum (ca. 1,17 m)
Untergrund:	fest (Asphalt)
Besonderheiten:	keine

Funktionsprinzipien:	GPS, Radar, Fahrradcomputer, Beschleunigungssensor

Weltausstellungsallee vom Start/Ziel aus in südliche Richtung

Teststrecke 2.0 befindet sich direkt auf dem EXPO-Gelände von 2000. Dieser Rundkurs beginnt wenig unterhalb der nordöstlichen Kurve (siehe Abbildung). An dieser Stelle kann eine problemlose Initialisierung (Feststellung der ersten Positionierung) durchgeführt werden, was eine Messung zunächst erst einmal ermöglicht und zugleich optimale Bedingungen für GPS-Geräte darstellt. Durch die hier durchgeführten Tests sollen die Auswirkungen von eingeschränkter Sicht - und dem daraus resultierenden verschlechterten Empfang der GPS-Signale - auf die Genauigkeit der Distanz- und Geschwindigkeitsmessung überprüft werden. Die Sicht wird immer zu mindestens einer Seite eingeschränkt oder teilweise völlig verdeckt, da die direkt angrenzenden Gebäude eine Höhe von ca. 10-15 m aufweisen. Hier sind auch Mehrwegausbreitungen (Multipath) vorstellbar. Während der Fußgängerüberweg im östlichen Teil der Strecke für besonders große Abschattungen sorgt, wird im westlichen Teil entlang der EXPO-Plaza ein ähnlicher Effekt durch Gebäude auf beiden Seiten erzeugt.

Lissabonner Allee in westliche Richtung, ehemaliger Deutscher Pavillon (rechts)

EXPO-Plaza in nördliche Richtung

Der Verlauf ist, abgesehen von den vier Kurven, die genau aufgenommen wurden, erneut sehr gerade und es kommt, bezogen auf den Start-/Zielpunkt, zu einem maximalen Höhenunterschied von nur ca. 2 m. Hierdurch können gleichmäßige Geschwindigkeiten erreicht werden. Im Wesentlichen dient die Teststrecke 2.0 also zur Untersuchung der Genauigkeit bei eingeschränkten Sichten, die durch Gebäude verursacht werden

Länge:	824 m
Verlauf:	gerade (mit 4 Kurven)
Steigung:	kaum (ca. 2 m)
Untergrund:	fest (Pflaster)
Besonderheiten:	eingeschränkte Sichten zu mindestens einer Seite
Funktionsprinzipien:	GPS

Allee in nördliche Richtung, Hauptgebäude Universität Hannover (rechts)

Durch diese Teststrecke sollten erneut die Auswirkungen von eingeschränktem Empfang von Satellitensignalen (GPS) auf die Genauigkeit der Geräte getestet werden. Die Abschattungen wurden hierbei jedoch nicht durch Gebäude, sondern durch Bäume verursacht, die sich zu beiden Seiten der Allee erstreckten. Auch hier war die Sicht erst ab Elevationen von mindestens 50 – 60° uneingeschränkt. Zudem wurde eine typische Lauf- und Fahrradstrecke genutzt, die einen sehr geraden und fast ebenen Verlauf (ca. 2m Höhenunterschied) aufwies. Der beliebte Freizeitweg befindet sich im Georgengarten, Hannover, in unmittelbarer Nähe zum Hauptgebäude der Universität Hannover und angrenzend an die Herrenhäuser Gärten (nördlich des Georgengartens). Aufgrund der guten Konfiguration (1000 m Länge, typischer Untergrund und typische Bepflanzung), wurden auf dieser Strecke, ergänzend zur Referenz, alle Geräte getestet.

Allee in nördliche Richtung bei 500 m, Haltestelle Schneiderberg (rechts)

Länge:	1000 m
Verlauf:	gerade
Steigung:	kaum (ca. 2 m)
Untergrund:	mittel bis fest (Schotter)
Besonderheiten:	konstant eingeschränkte Sichten zu beiden Seiten
Funktionsprinzipien:	GPS

Waldweg in südliche Richtung

Das dargestellte Waldstück befindet sich südlich von Hannover-Wülferode. Hier sollen die GPS-Geräte unter den für sie sehr schlechten Bedingungen getestet werden. Auf der 500 m langen Strecke ist so gut wie keine Sicht nach oben möglich. Die zur Zeit der Tests stark begrünten Baumkronen der Laubbäume sollten also die Signale der GPS-Satelliten stark abschwächen oder die Strecke komplett abschirmen. Bis auf einen „Knick“ bei 280 m (siehe Abbildung) ist der Streckenverlauf gerade, wodurch eine Auswertung der Querabweichungen möglich ist. Grundsätzlich ist zunächst zu überprüfen, ob die Geräte überhaupt Signale empfangen und falls dies der Fall ist, wie genau Distanz- und Geschwindigkeitsmesser arbeiten. Der Startpunkt befindet sich dabei in einer kleinen Schneise (Parkplatz) am nördlichen Ende der Strecke. Hier sind die Bedingungen zur Initialisierung noch am besten.

Länge:	500 m
Verlauf:	gerade (1 Richtungsänderung)
Steigung:	keine
Untergrund:	mittel bis fest (Waldweg)
Besonderheiten:	konstant stark eingeschränkte bis gar keine Sicht
Funktionsprinzipien:	GPS

Künstlich angelegter Hügel in östlicher Richtung

Mit Hilfe dieser Strecke sollen die angezeigten bzw. aufgezeichneten Höhen der Geräte auf ihre Genauigkeit untersucht werden. Dabei werden sowohl absolute als auch relative Höhen (Höhenunterschiede) betrachtet. Es handelt sich um einen künstlich angelegten Hügel, der zu den Grünanlagen der EXPO 2000 gehört. Der Vorteil hierbei liegt vor allen Dingen in der gleichmäßigen Steigung auf beiden Seiten des Hügels. Für die Tests fand eine Aufnahme bzw. Einmessung von signifikanten Punkten in Lage und Höhe statt, die daraufhin abgelaufen wurden. Die 195 m lange Strecke besitzt auf beiden Seiten eine Steigung von 13 m (ca. 17 % Anstieg bzw. Gefälle). Zusätzlich zu den reinen Höhen (-unterschieden) kann hier auch die Distanz auf ihre Genauigkeit überprüft werden.

Länge:	194 m
Verlauf:	gerade
Steigung:	13 m (auf beiden Seiten → 17 %)
Untergrund:	mittel bis fest (Schotter)
Besonderheiten:	große, gleichmäßige Höhenunterschiede
Funktionsprinzipien:	GPS (mit Höhe), Barometrische Höhenmessung

Mit Hilfe der Tests auf Strecke 4.1 soll erneut die Genauigkeit der absoluten und relativen Höhen überprüft werden. Mit einer Länge von 259 m und einem Höhenunterschied von 12 m (ca. 5%) wird hier ein gleichmäßiger Abstieg bzw. Aufstieg simuliert, da der Rundweg (siehe Abbildung) an jeder Stelle den gleichen Neigungswert annimmt. Es handelt sich um den gleichen künstlich angelegten Hügel wie bei Teststrecke 4.0, nur dass hierbei eine längere Distanz zurückgelegt wird. So können die von den Geräten gemessenen Distanzen bzw. deren Genauigkeiten untersucht werden.

Länge:	259 m
Verlauf:	komplett kurvig
Steigung:	12 m (5 %)
Untergrund:	mittel bis fest (Schotter)
Besonderheiten:	gleichmäßig über die Strecke verteilter Höhenunterschied
Funktionsprinzipien:	GPS (mit Höhe), Barometrische Höhenmessung

Ostufer in nördliche Richtung

Diese 400 m lange Teststrecke befindet sich direkt am Ostufer des Maschsees in Hannover. Die beliebte Maschseepromenade ist Anlaufort für viele Spaziergänger, Radfahrer, Läufer, usw. Die Strecke verläuft parallel zum Rudolf-von-Benningsen-Ufer (Straße), wobei sich der Startpunkt am nördlichen Ende, der Zielpunkt am südlichen Ende, nördlich des Strandbads, befindet (siehe Abbildung). Die Tests betreffen nur Geräte, die zurückgelegte Distanzen mit Hilfe von Radar bestimmen. Besonders interessant ist das Verhalten bzw. die Genauigkeit dieser Distanzen bei einer stark bewegten Umgebung. Durch den belebten Weg können gerade durch entgegenkommende Personen aber auch durch die Bäume entlang der kompletten Strecke Unsicherheiten bei dem besagten Verfahren auftreten. Der Streckenverlauf ist gerade und auch der Untergrund ist fest, was andere Einflüsse auf die Genauigkeit möglichst klein halten sollte. Die Tests wurden während des Maschseefests durchgeführt, was die ohnehin schon belebte Promenade noch lebendiger machte.

3.3 Beschreibung der Teststrecken

Länge:	400 m
Verlauf:	gerade
Steigung:	keine
Untergrund:	mittel bis fest (Schotter/Teer)
Besonderheiten:	stark bewegte Umgebung
Funktionsprinzipien:	Radar

Strecke in nördliche Richtung, ehemaliger Niederländischer Pavillon (links)

Um die Eigenschaften der Distanz- und Geschwindigkeitsmessung der Geräte mit Beschleunigungssensor und Radarmessung auf weichem Untergrund zu testen, wird die Teststrecke 6.0 genutzt. Sie verläuft parallel zum Boulevard du Montreal unmittelbar neben dem ehemaligen EXPO-Gelände (Hannover-Mittelfeld). Der weiche Untergrund beeinflusst den Laufstil bzw. das Laufverhalten, da ein erhöhtes Einsinken in den Boden unvermeidbar ist. Interessant für die Messung mit Radar sind besonders die sich durch Rasen stark ändernden Reflexionseigenschaften. Die Tests wurden bei trockenem Rasen durchgeführt um Effekte, die durch zusätzliche Feuchtigkeit hervorgerufen werden, ausschließen zu können.

Länge:	500 m
Verlauf:	gerade
Steigung:	unterschiedlich (maximal 4 m)
Untergrund:	weich (Rasen)
Besonderheiten:	keine
Funktionsprinzipien:	Beschleunigungssensor, Radar

Strecke in südliche Richtung

Teststrecke 7.0 liegt genau wie die zuvor vorgestellte Teststrecke 6.0 in Hannover-Mittelfeld. Sie verläuft geradlinig entlang des angelegten Fußwegs parallel zum Boulevard du Montreal. Hierbei handelt es sich jedoch um einen von der härte her mittleren Untergrund. Für den Weg wurde lockerer Schotter aufgefahren. Dieser ist im Gegensatz zu den zuvor betrachteten Strecken mit festen Untergrund (Schotter) nicht festgefahren und somit nicht als fest zu betrachten. Die hier geplanten Tests sind auch wieder speziell für Geräte mit Beschleunigungsmesser oder Radar ausgelegt.

Länge:	500 m
Verlauf:	gerade
Steigung:	variiert (maximal 4 m)
Untergrund:	mittel (lockerer Schotter)
Besonderheiten:	keine
Funktionsprinzipien:	Beschleunigungssensor, Radar

Startpunkt der Strecke, ehemaliger Pavillon der Niederlande (rechts)

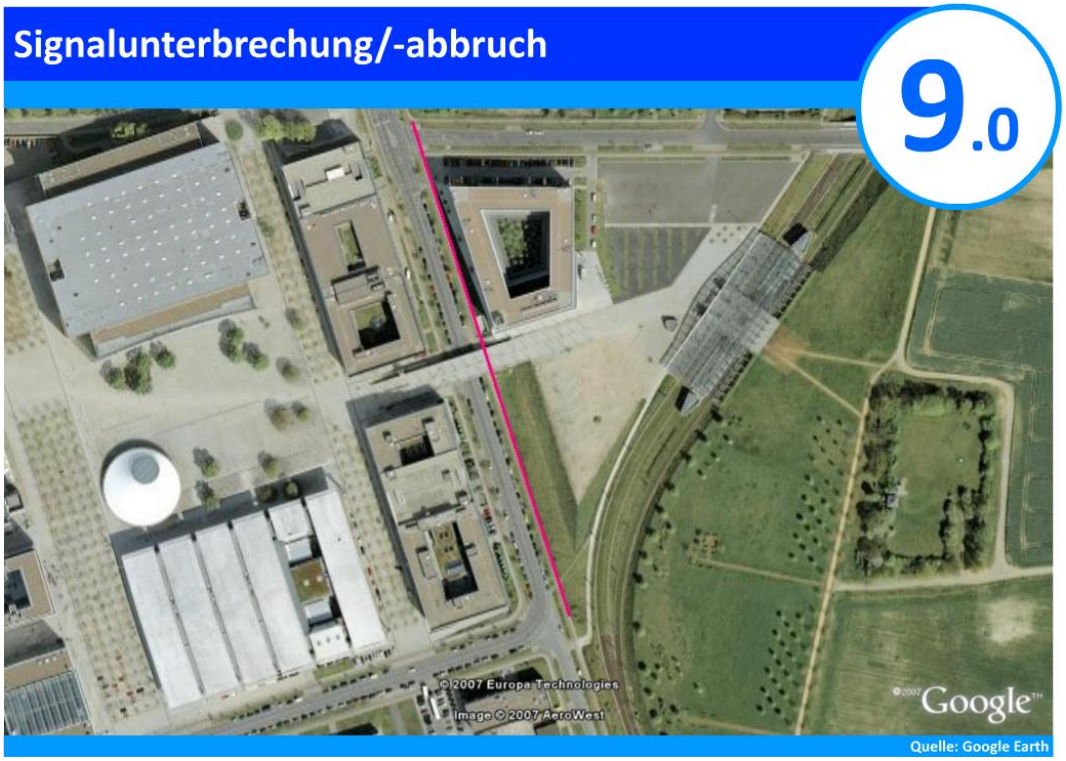
Die Teststrecke 8.0 befindet sich direkt auf dem ehemaligen EXPO-Gelände und verläuft über verschiedene Straßen bzw. Fußwege. Hier soll die Genauigkeit der Distanz- und Geschwindigkeitsmesser auf einer relativ langen kurvigen Strecke getestet werden. Bei Geräten mit Trackaufzeichnung lassen sich zudem noch Aussagen zu den vermutlich angewandten Filtern und somit zum Kurvenverhalten allgemein treffen. Bei Kurven kann man zwischen verschiedenen Verhaltensweisen unterscheiden. Entweder es kommt zu einem sogenannten Drift, d.h. dass die gemessene Distanz scheinbar länger wird, weil sich die Geräte in einer Drehbewegung befinden und teilweise Positionen und/oder Distanzen vorausberechnen, die dann aus der tatsächlichen Kurve herausragen, oder es werden Teile „abgeschnitten“, was durch eine Glättung der Kurve zustande kommen kann und was dazu führt, dass die gemessenen Distanzen zu niedrig sind. Der Startpunkt befindet sich am nördlichen Ende des Kurses (siehe Abbildung). Die Strecke wurde so eingemessen, dass verschiedene Typen von Richtungsänderungen/Kurven getestet werden. Die ersten beiden Kurven der Strecke stellen dabei abrupte Richtungsänderungen dar. Sie werden durch eine Drehung in

Plötzlicher Spurwechsel von Fußweg (rechts) auf Fahrbahn (links)

Parkanlage, Ende der langgezogenen Kurve, 180°-Wende (vor orangenem Pavillon)

einem Punkt beschrieben. Die nächsten drei Richtungsänderungen sind durch mehrere gemessene Punkte realisiert und so quasi abgerundet. Der südliche Teil der Strecke (siehe Abbildung) besteht aus zwei plötzlichen Spurwechseln, bevor es dann zu einer lang gezogenen, besonders abgerundeten Kurve (ca. 30 Messpunkte) kommt. Hiernach kommt es zu einer kompletten 180°-Wende, die in/auf einem Punkt ausgeführt wird. Zuletzt folgen noch zwei leicht abgerundete Kurven, die erneut durch zwei Koordinaten bestimmt sind. Somit können eine Vielzahl von verschiedenen Situationen simuliert werden. Die Tests sind dabei für alle Geräte relevant. Der Empfang der Satellitensignale ist wenig bis gar nicht eingeschränkt und auch sonst sollten keine weiteren äußeren Einflüsse die Ergebnisse verfälschen.

Länge:	1082 m
Verlauf:	kurvig
Steigung:	unterschiedlich (wenige Meter)
Untergrund:	fest (Teer oder Pflaster)
Besonderheiten:	Kurven, plötzlicher Spurwechsel und 180°-Wende
Funktionsprinzipien:	GPS, Beschleunigungssensor, Radar, Fahrradcomputer



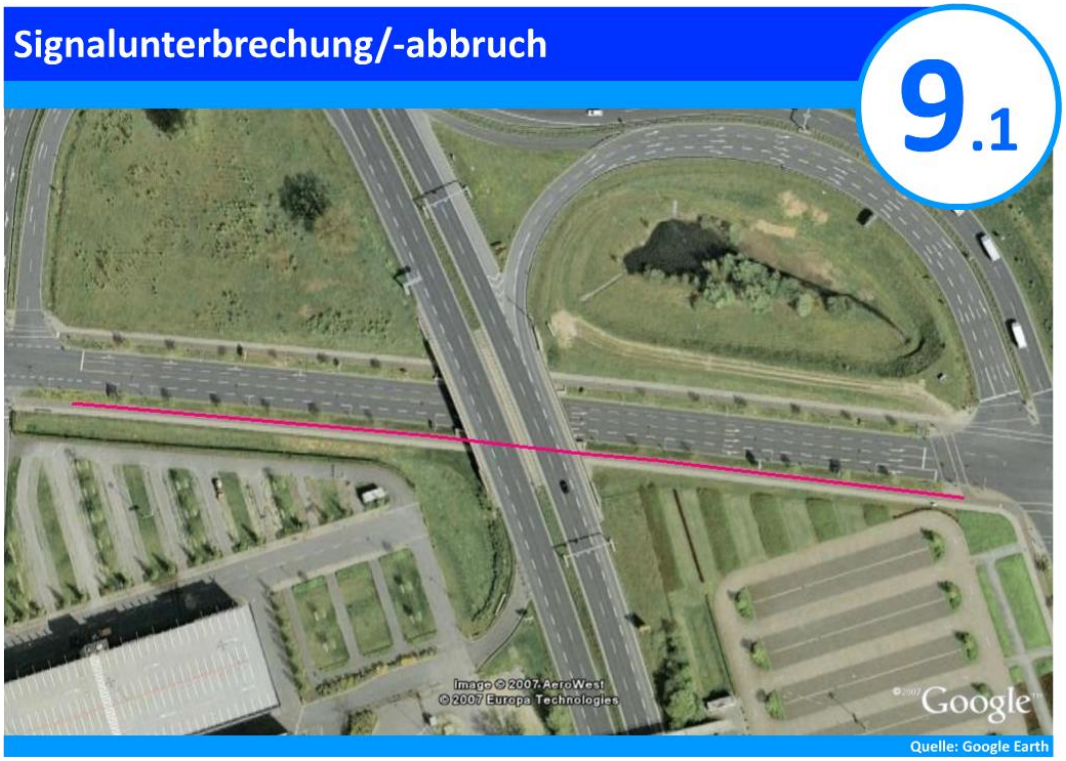
Startpunkt (im Vordergrund), Weltausstellungsallee in nördliche Richtung

Mit Hilfe von Teststrecke 9.0 soll das Verhalten von Geschwindigkeits- und Distanzmessern, die das Satellitenpositionierungssystem GPS nutzen, bei Signalunterbrechung bzw. kompletten Signalabbruch untersucht und gleichzeitig Aussagen zu den Genauigkeiten getroffen werden. Die Strecke befindet sich direkt auf dem Fußweg entlang der Weltausstellungsallee. Die Besonderheit hierbei ist, dass die Strecke von einer Fußgängerbrücke überführt wird (siehe Abbildung), die mit einer Breite von 15 m die gewünschten bzw. zu testenden Effekte erzeugen soll. Dabei ist der Kurs für zwei verschiedene Arten von Tests in zwei Längen aufgeteilt. Zunächst soll die Genauigkeit der gemessenen Distanzen per Durchlauf (also mit Signalunterbrechung) auf die komplette 317 m lange Strecke untersucht werden. Der Startpunkt befindet sich dabei am südlichen Ende, von dem aus auch der zweite Teil der Tests startet. Dieser soll das Verhalten der Geräte (bzw. der Distanzen und Geschwindigkeiten) nach Signalabbruch zum Vorschein bringen. Hierfür befindet sich auch ein Zielzeichen in der Mitte der Unterführung. Ist dieses Ziel bei 167 m erreicht, wird dort 30 Sekunden ausgeharrt. Geachtet wurde dabei wieder auf gute Wetterverhältnisse und vor

Fußgängerüberweg, Weltausstellungsallee in südliche Richtung

allem auf einen Startpunkt, der eine einwandfreie Initialisierung ermöglicht.

Länge:	317 m (167 m Tunnelmitte)
Verlauf:	gerade
Steigung:	kaum (ca. 4 m – gesamte Strecke)
Untergrund:	fest (Pflaster)
Besonderheiten:	Signalunterbrechung bzw. Signalabbruch
Funktionsprinzipien:	GPS



Unterführung des Messeschnellwegs

Teststrecke 9.1 wird ebenfalls zur Untersuchung der Genauigkeit von Geschwindigkeits- und Distanzmessern mit GPS genutzt. Sie befindet sich auf dem Fußweg entlang der Hermesallee. Der Messeschnellweg, der die Strecke überführt sorgt mit einer beachtlichen Breite von 35 m für eine komplette Abschattung der GPS-Signale. Während es auf Strecke 9.0 noch möglich war, die Signale von Satelliten unter einer sehr geringen Elevation oder stark abgeschwächte Signale zu empfangen, kann dies hier ausgeschlossen werden. In Tunnelmitte besteht weder eine Sicht zum Himmel noch können abgeschwächte Signale durch den dicken Stahlbeton der Brücke hindurch empfangen werden. Beim Ablauf der 277 m langen Strecke kann es dadurch bereits schon zu Signalabbrüchen kommen. Werden die Tests vom Startpunkt am westlichen Ende (siehe Abbildung) bis zur 142 m entfernten Tunnelmitte mit anschließendem Stehenbleiben durchgeführt, können wiederum Aussagen über Verhalten und Genauigkeit bei Signalausfällen getroffen werden. Dadurch zeigt sich auch eine mögliche Vorausberechnung von Positionen, usw.

3.3 Beschreibung der Teststrecken

Länge:	277 m (142 m Tunnelmitte)
Verlauf:	gerade
Steigung:	kaum (ca. 4 m - Tunnelmitte)
Untergrund:	fest (Pflaster)
Besonderheiten:	Signalunterbrechung bzw. Signalabbruch
Funktionsprinzipien:	GPS

Startpunkt der Strecke – Hermesalle in östliche Richtung

Bei den Geräten, die Beschleunigungssensor oder Radarmessungen nutzen, sind vor allem unterschiedliche Lauftechniken zu testen, was auf Teststrecke 10.0 geschieht. Sie entspricht der Strecke 9.1, ist jedoch mit einer Länge von 159 m etwas kürzer. Bei Radargeräten ist die Genauigkeit der Distanzmessung insbesondere bei unterschiedlicher Anbringung des Sensors (seitlich oder nach hinten gerichtet) zu untersuchen. Andere Anbringungsorte sollen im Rahmen der Möglichkeiten und der typischen Art und Weise der Nutzung auch bei Beschleunigungssensoren überprüft werden. Das Messverhalten und die Genauigkeit der besagten Sensoren sind bei rückwärts zurückgelegtem Weg genauso interessant wie bei Radarmessgeräten. Außerdem sind die verschiedenen Laufstile und –Techniken für die Streckengenauigkeit von Bedeutung. Grundsätzliche Laufstile wie Gehen, Walken und Springen sind hier genauso zu testen wie verschiedene Schrittweiten und Abrolleigenschaften beim Laufen. Um eine zeitverzögerte Anzeige/Übertragung der Werte von Sensor zu Display bzw. das Verhalten der Geräte nach abrupten Anhalten zu überprüfen, wird nur ein Teilstück der Strecke (110 m – noch bis vor Tunnelbeginn) zurückgelegt. Hier werden nicht nur Beschleunigungs- und Radarmesser getestet,

Strecke in westliche Richtung

sondern auch GPS-Geräte. Auf der kompletten Teilstrecke kommt es dabei zu keinerlei Abschattungen oder anderen Störeinflüssen.

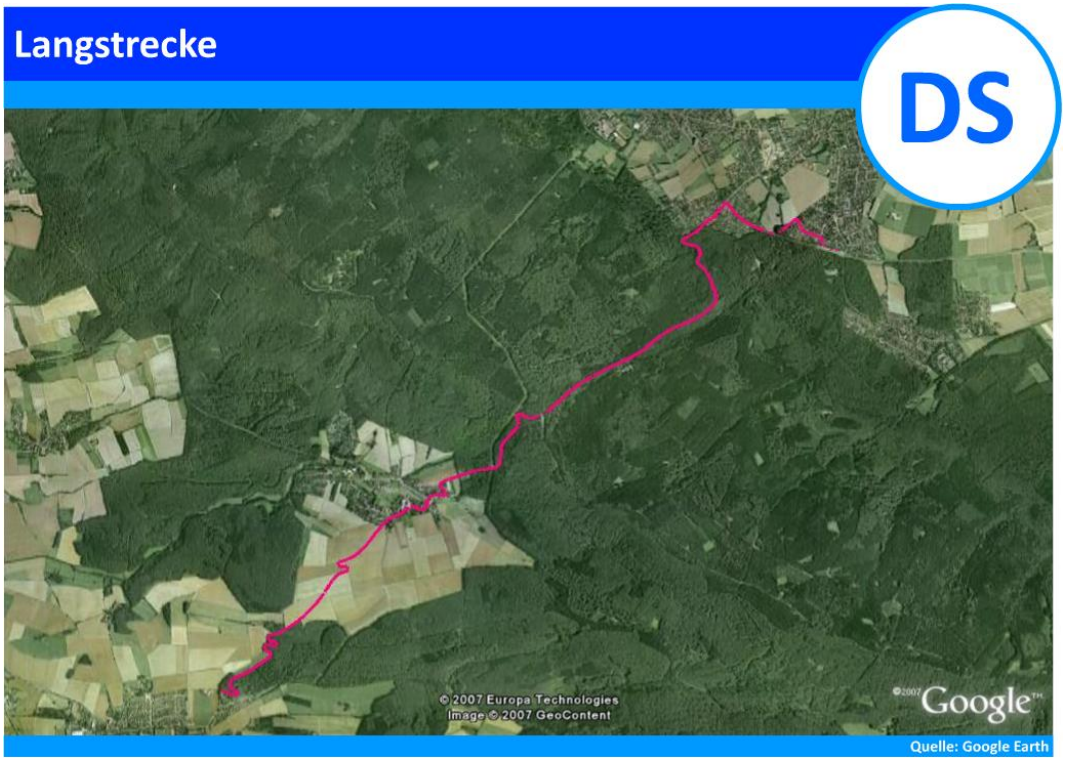
Länge:	159 m (110 m)
Verlauf:	gerade
Steigung:	kaum (ca. 4 m - Tunnelmitte)
Untergrund:	fest (Pflaster)
Besonderheiten:	Verschiedene Lauftechniken, -stile, Anbringungsorte, Ausrichtungen, plötzliches Anhalten
Funktionsprinzipien:	Radar, Beschleunigungssensor, GPS

Das Messdach des Geodätischen Instituts der Universität Hannover bietet mehrere Messpfeiler (siehe Abbildung). Diese eignen sich besonders gut für Positions-, Lage- und Höhengenauigkeitstests der Geräte, die mit Hilfe von GPS Koordinaten speichern. Dank der Platzierung auf dem Gebäudedach kommt es zu keinerlei Abschattungen, wodurch die Bedingungen für GPS-Messungen optimal sind. Aus diesem Grund finden hier auch fast permanent Messungen zu Forschungszwecken statt. Außerdem ist es von großer Bedeutung für die Untersuchung der Genauigkeit absoluter Werte, dass die Koordinaten der Testpfeiler exakt bekannt sind, um einen geeigneten Ist-Soll-Vergleich durchführen zu können. Für die bei den Untersuchungen eingesetzten Pfeiler ist dies der Fall. Die Geräte wurden hier mehreren einstündigen Tests unterzogen, wobei alle gleichzeitig und somit unter den gleichen Bedingungen zum Einsatz kamen.

Länge:	0 m
Verlauf:	-
Steigung:	-
Untergrund:	-
Besonderheiten:	Test der Positions-, Lage- und Höhengenauigkeit
Funktionsprinzipien:	GPS

Neben der Untersuchung absoluter und relativer Höhengenauigkeiten auf den Teststrecken 4.0 und 4.1 werden die absoluten Höhen der Geräte mit barometrischer Höhenmessung noch einmal innerhalb eines Gebäudes ohne jegliche andere Einflüsse (Temperaturschwankungen, Änderung der Luftfeuchtigkeit, usw.) getestet. Besonders für solche Tests geeignet ist das „MZ“-Gebäude der Universität Hannover, indem sich unter anderem auch das Institut für Kartographie und Geoinformatik befindet. Im Treppenhaus liegt die vertikale Gravimeter-Eichstrecke Hannover, die durch mehrere Punkte mit exakt bekannter Höhe in den verschiedenen Etagen (18 Etagen und 2 Untergeschosse) realisiert wird. Im Rahmen der Tests wurden jeweils in jeder vierten Etage Höhen gemessen. Dadurch ist ein Ist-Soll-Vergleich der absoluten Höhen möglich.

Länge:	0 m
Verlauf:	-
Steigung:	ca. 69 m
Untergrund:	-
Besonderheiten:	Absolute Höhen
Funktionsprinzipien:	Barometrische Höhenmessung



Um das Verhalten der Geräte auf einer längeren Strecke über eine längere Zeit zu untersuchen, wird diese Teststrecke genutzt. Sie befindet sich südwestlich von Hannover und führt über den Deister. Am nördlichen Ende (siehe Abbildung) in Egestorf beginnt bzw. endet der insgesamt ca. 18,5 km lange Kurs. Angefangen bei etwa 110 m Höhe, wird am höchsten Punkt des Nienstedter Passes eine Höhe von ungefähr 276 m erreicht. Nach der komplett bewaldeten Verbindung zwischen Egestorf und Nienstedt führt die Strecke noch bis an die Ortsgrenze von Eimbeckhausen, wo gewendet wird, um den gleichen Weg nach Egestorf zurück zu nutzen. Besonders geeignet ist diese Teststrecke für Vergleichstests der Geräte untereinander. Hier kann nicht nur der aufgezeichnete Track, sondern auch Höhen, Distanzen und Durchschnittswerte der einzelnen Geräte miteinander verglichen werden. Es existieren jedoch keine Sollkoordinaten bzw. –höhen, so dass keine Aussagen über die absolute Genauigkeit der Geräte getroffen werden können.

Länge:	ca. 18,5 km
Verlauf:	ungleichmäßig - kurvig, gerade
Steigung:	maximal ca. 166 m
Untergrund:	fest
Besonderheiten:	Vergleichstests
Funktionsprinzipien:	GPS, Fahrradcomputer

4. Beschreibung der Geräte

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Genauigkeitsuntersuchung bei Sportuhren mit Distanz- und Entfernungsmessfunktion. Für die Tests standen die nachstehenden Geräte zur Verfügung, wobei in Klammern die jeweiligen Messprinzipien angeführt sind:

- Garmin Edge 305 (GPS, Fahrradcomputer, barom. Höhenmessung)
- FRWD W600 (GPS, barom. Höhenmessung)
- Casio GPR 100 (GPS)
- Garmin Forerunner 305 (GPS)
- Ciclosport HAC5 + RDS II (Radar, Fahrradcomputer, barom. Höhenmessung)
- Polar S625X (Beschleunigungssensor, barom. Höhenmessung)

Die Geräte werden dazu zunächst einzeln beschrieben und anschließend kommt es zu einem gegenseitigen Vergleich.

Die Gerätebeschreibungen sind folgendermaßen aufgebaut:

1) Objektive Beschreibung der Geräte (Lieferumfang, Funktionsumfang usw.)
2) Bedienung (subjektiv)
3) Tragekomfort (subjektiv)
4) Auswertungen der Testergebnisse / Genauigkeitsuntersuchung
5) Zusammenfassung

4.1 Garmin Edge 305

Hersteller:	GARMIN
Bezeichnung/Modell:	Edge 305
Eingesetzte(s) Messverfahren:	GPS, Barometrische Höhenmessung
Funktionen:	Distanz, Geschwindigkeit, Höhe, Neigung, Kalorienverbrauch, Puls, Steuerkurs, Trittfrequenz, Uhrzeit, Stoppuhr
Maße (BxHxT):	47 x 94 x 23 mm
Gewicht:	79 g
Lieferumfang:	Edge 305, USB-Übertragungskabel, Steckdosenadapter (für UK), Pulsmesser (Brustgurt), Ladegerät, Fahrradhalter (2 x), GSC 10 Geschwindigkeits- und Trittfrequenzmesser, Kurzanleitungen für Edge 305, GSC10 und Pulsmesser, Handbuch (Deutsch, Englisch), Software CD (Garmin Training Center)
Akkulaufzeit:	bis zu 12 Std.
Preis:	ca. 395.- €

4.1.1 Gerätebeschreibung

Der GARMIN Edge 305 ist eigentlich ein reiner Fahrradcomputer, nutzt aber hauptsächlich das GPS-System zum Aufzeichnen der Tracks und zur Berechnung und Anzeige der Distanzen und Geschwindigkeiten. Er ist in verschiedenen Sets erhältlich, wobei für die Tests die komplette Ausstattung mit GSC 10 Geschwindigkeits- und Trittfrequenzsensor sowie ein Herzfrequenzmesser in Form eines Brustgurts zur Verfügung steht. Die Stromversorgung des Hauptgeräts wird durch einen Lithium-Ionen-Akku sichergestellt, der laut Hersteller für bis zu 12 Stunden Betrieb ausgelegt ist. Zum

Laden des Akkus wird die Mini-USB-Schnittstelle an der Rückseite des Edge 305 genutzt. Dadurch kann das Gerät nicht nur durch Nutzung des mitgelieferten Ladegeräts (Kabellänge: ca. 1,80 m), sondern auch durch Anschluss an einen PC/Laptop mittels USB-Übertragungskabel (ca. 1,10 m) geladen werden. Der Edge besitzt ein Monochrom-Display (ca. 28 x 35 mm), das neben Standardsymbolen für Batteriezustand, Satelliten-, Pulsmesser- und Trittfrequenzmesserempfang verschiedenste Messwerte (oder aus diesen berechnete Größen) anzeigen kann. Die Gerätefirmware bietet mehrere Menüs, die folgende Informationen enthalten: Nach dem Einschalten des Edge erscheint direkt auf den Startbildschirm folgend ein Skyplot der Satelliten, der deren Konstellation am Himmel verdeutlicht. Außerdem wird hier die erreichbare GPS-Genauigkeit angegeben. Nach einer durchschnittlichen Initialisierungszeit von 32 Sekunden sind die Mehrdeutigkeiten gelöst. Garmin legt hierfür eine Grenze bei maximal 44 Sekunden (Kaltstart) fest, die während der Tests an verschiedenen Standorten auch nie überschritten wurde. Daraufhin wechselt die Anzeige direkt in das Fahrrad-Computer-Menü, wo eine Anzahl von 1 bis 8 verschiedenen Messgrößen und berechneten Werten (z.B. verschiedene Durchschnittswerte) pro Seite (insgesamt zwei Datenseiten) dargestellt werden kann. Alle angezeigten Größen unterliegen einer Aktualisierungsrate von 1 Sekunde. Eine weitere mögliche Ansicht ist die Betrachtung der zurückgelegten Strecke in verschiedenen Maßstäben zusammen mit der momentanen Geschwindigkeit sowie ein Höhenprofil über die zurückgelegte Strecke mit Angabe der momentanen Höhe und des bisherigen Gesamtaufstiegs. Zuletzt können im Hauptmenü noch diverse Einstellungen vorgenommen werden. Dazu gehören die Verwaltung der aufgezeichneten Protokolle, verschiedene Trainingseinstellungen (AutoPause, Alarme, Virtual Partner, usw.), Navigationsoptionen (Speichern und Aufsuchen von Wegpunkten, Verwaltung von Routen und Ansicht des Skyplots) und allgemeine Einstellungen (Anzeigeeinstellungen, Eingabe des Nutzerprofils sowie der Fahrradprofile (bis zu 3 Profile), Auswahl der Einheiten und der verschiedenen Puls- oder Geschwindigkeitsbereiche). Hier lässt sich auch die Datenaufzeichnung konfigurieren. Wird ein Aufzeichnungsintervall von 1 Sekunde gewählt, so kann der interne Flash-Speicher nur bis zu 3,5 Stunden beschrieben werden. Ist der Speicher voll, werden existierende Daten überschrieben. Abhilfe schafft hier die Möglichkeit der intelligenten Aufzeichnung, bei der nur „wichtige“ Punkte gespeichert werden, wodurch sich die Datenmenge abhängig der zurückgelegten Strecke reduziert. Mit Hilfe des Datenkabels und der mitgelieferten Software (einschließlich Treiber) „Garmin Training Center“ können Trainings bzw. Tracks vom Edge zu einem PC/Laptop, aber auch umgekehrt, übertragen werden.

Primäres Messverfahren des Edge 305 ist die GPS-Positionierung bzw. Navigation. Das Herzstück der eingebauten Kombination aus GPS-Antenne und Empfänger ist der verwendete SiRF SiRFstarIII Chipsatz. Dieser zeichnet sich nicht nur durch seine sehr geringe Größe, sondern vor allem durch die hohe Empfangsempfindlichkeit von -159dBm und die große Anzahl an simultan agierenden Korrelatoren aus. Außerdem können zur Steigerung der Genauigkeit WAAS-/EGNOS-Korrekturdaten empfangen werden. Für die Höhenkomponente ist zusätzlich ein barometrischer Höhenmesser zur „hoch genauen Höhen- und Gradientenbestimmung“ (Handbuch) eingebaut. Über das

genaue Zusammenspiel der Sensoren (GPS und barometrischer Höhenmesser) lässt sich jedoch vorerst keine präzise Aussage treffen. Vorstellbar wäre eine GPS-Messung mit ergänzenden relativen Höhen (Höhenunterschieden) aus barometrischer Höhenmessung. Sicher ist jedoch, dass Geschwindigkeits- bzw. Distanzinformationen vom GSC 10 nur genutzt werden, wenn kein GPS-Empfang besteht oder das Signal nur sehr schwach ist.

4.1.2 Bedienung

Während die mitgelieferte Kurzanleitung (12 Seiten) ausschließlich die Grundlagen über die Montage der Komponenten, Laden des Akkus sowie die allerersten Schritte nach dem erstmaligen Einschalten des Edge 305 beschreibt, räumt das ca. 90-seitige Handbuch alle weiteren Fragen aus. Dieses ist sehr anschaulich (mit vielen Bildern) und übersichtlich gestaltet. Durch das Inhaltsverzeichnis am Anfang oder das Schlagwortverzeichnis am Ende der Bedienungsanleitung werden gesuchte Themen/Begriffe sehr schnell gefunden. Für die Bedienung des Edge 305 ist es aber nicht unbedingt erforderlich die Anleitung komplett durchgelesen zu haben. Das Gerät lässt sich fast intuitiv durch Nutzung der 7 Steuertasten, die durch ihre Beschriftung bereits eindeutig zugeordnet werden können, bedienen. Die Menüführung ist leicht verständlich und übersichtlich gestaltet (Abbildung 23). Je nach Wunsch besteht beim Fahrrad-Computer-Menü die Möglichkeit, sich einen, zwei, vier oder acht Werte anzeigen zu lassen. Diese „Datenfelder“ können daraufhin zusätzlich nach Belieben mit dem gewünschten Messwert belegt werden. In Abbildung 23 werden beispielsweise Zeit (Stoppuhr), Geschwindigkeit, Distanz, Uhrzeit, verbrauchte Kalorien, Himmelsrichtung, GPS-Genauigkeit und Höhe angezeigt. Einzig und allein die Karte mit der zurückgelegten Strecke ist nicht sonderlich übersichtlich. Hier befindet sich weder eine Straßenkarte im Hintergrund noch kann man diese verschieben. Wird eine längere Distanz zurückgelegt, kann dieser Teil nur durch eine Änderung des Maßstabs überhaupt betrachtet werden, was eine dementsprechend schlechte Auflösung dieses Teilstücks zur Folge hat. Der Lithium-Ionen-Akku versorgt den Edge 305 über einen großen Zeitraum mit Strom und bedarf gleichzeitig einer sehr geringen Ladedauer. Für das Schließen der Gummi-Abdeckung des Mini-USB-Anschlusses auf der Rückseite des Geräts benötigt man jedoch etwas Fingerspitzengefühl. Der Pulsmesser wird mit einer Knopfbatterie (angegebene Lebensdauer: etwa 3 Jahre) geliefert. Beim Testgerät war diese Batterie allerdings von Anfang an leer. Ansonsten treten keinerlei Probleme bei der Benutzung/Anbringung des

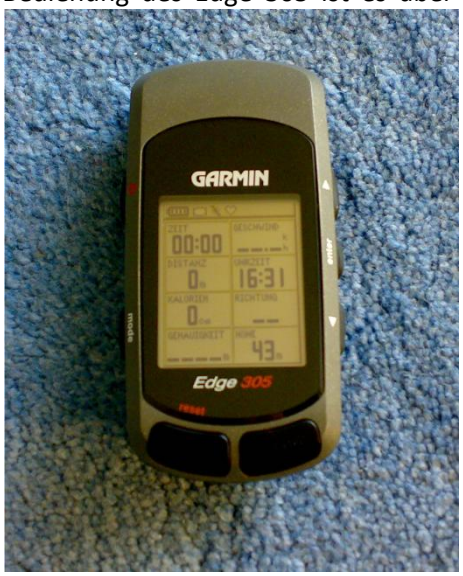


Abbildung 23: Anzeige des Edge 305

Brustgurts auf. Die Montage des GSC 10 am Fahrrad gestaltet sich hingegen etwas komplizierter: Für eine einwandfreie Funktion müssen beide Magnete (Trittfrequenz am Pedal und Geschwindigkeit/Distanz in den Speichen des Hinterrads) sehr nah und stabil an dem Messgerät platziert sein. Sind Trittfrequenz- und Geschwindigkeitsmesser am Fahrrad angebracht und der Pulsmesser umgelegt, werden diese entweder automatisch gefunden oder können über das Hauptmenü manuell gesucht werden. Anschließend werden Messwerte dieser Sensoren aufgezeichnet, solange sich diese im Umkreis von maximal 3 m um den Edge befinden.

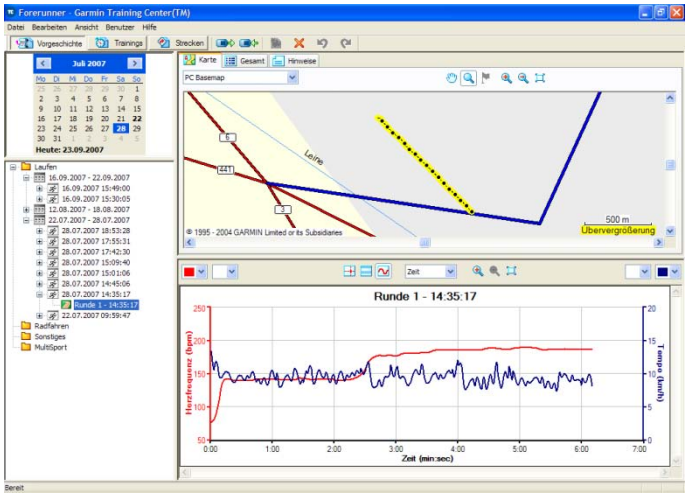


Abbildung 24: Garmin Training Center

Die Installation und Bedienung der mitgelieferten Software „Garmin Training Center“ ist unkompliziert. Wird das Unterprogramm „gstart“ beim Systemstart ausgeführt, wird der Anschluss des Edge automatisch erkannt und die Software gestartet. Der Anschluss des Geräts an einen PC/Laptop erfolgt mittels USB-Datenkabel. Mit wenigen Klicks werden anschließend die aufgezeichneten Strecken, Wegpunkte, usw. übertragen. Wie in Abbildung 24 ersichtlich wird, können hier in übersichtlicher Form Trainings aufgerufen und nach Datum sortiert werden. Außerdem wird der aufgezeichnete Track dargestellt, wobei Auflösung und Inhalt (Details) der Karte eher unbefriedigend sind. Abhilfe schafft kostenpflichtiges Kartenmaterial, was hier nicht weiter untersucht werden soll. Insgesamt enthält die Software aber nur wenige Einstellungsmöglichkeiten.

4.1.3 Tragekomfort

Das Gesamtgewicht der einzelnen Komponenten beträgt gerade einmal 193 g, wobei der Edge selbst mit 79 g sogar weniger wiegt als vom Hersteller angegeben (ca. 88 g). Dadurch, dass es sich um einen Fahrradcomputer handelt, ist das Gewicht ohnehin nicht so entscheidend. Der Pulsmesser (74 g) liegt mit seinem verstellbaren und elastischen Band gut an der Brust an (Umfang von ca. 63 – 86 cm).

4.1.4 Messprinzip GPS

Teststrecke 1.0 (optimale Bedingungen)

Für die Untersuchung der Genauigkeit der Distanz- und Geschwindigkeitsmessung des Garmin Edge 305 wurde dieser zunächst auf der Referenzstrecke (siehe Teststrecke 1.0) unter optimalen Bedingungen getestet. Dabei wurden folgende Distanzen gemessen:

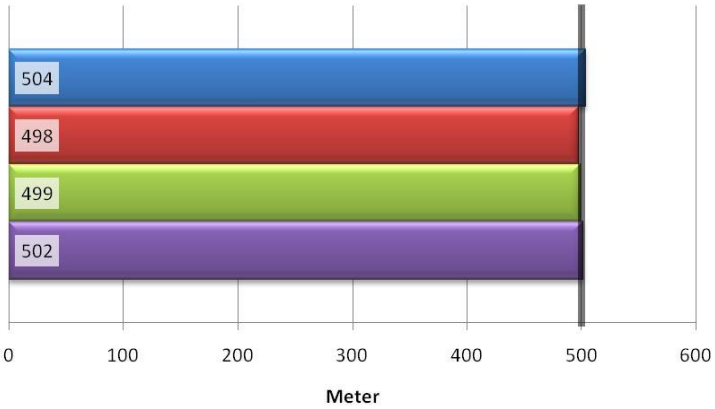


Abbildung 25: Teststrecke 1.0 - Angezeigte Strecken (Sollstrecke 500 m)

Aus den Werten inAbbildung 23 Abbildung 25 resultiert ein Mittelwert von 500,75 m und eine Standardabweichung von 2,38 m. Als streckenabhängige Genauigkeit kann dementsprechend ein Wert von > 99,2 % erreicht werden. Garmin gibt eine GPS-Geschwindigkeitsgenauigkeit von < 0,05 m/s bei optimalen Bedingungen an. Dies macht umgerechnet eine Streckengenauigkeit von > 98,2 % aus. Bei 500 m wären also beispielsweise 509 m gerade noch im angegebenen Genauigkeitsbereich. Da es sich in dieser Größenordnung noch um eine kurze Strecke handelt, sollten relative GPS-Messungen auch ohne Korrekturdaten noch streckenabhängige Genauigkeiten von > 99 % erreichen können, was hier auch der Fall ist. Der Edge 305 übertrifft bei optimalen Bedingungen im Lauftempo (8 – 12 km/h) somit sogar die Erwartungen.

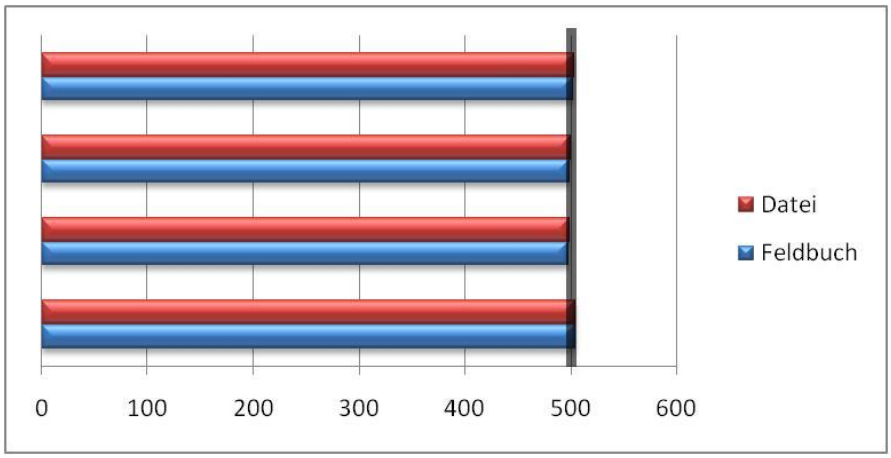


Abbildung 26: Teststrecke 1.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Auffällig waren hier bereits schon Unterschiede zwischen angezeigten und aufgezeichneten Werten (siehe Abbildung 26). Die Abweichungen betragen in diesem Fall maximal 1 m, wobei einiges dafür spricht, dass die gemessenen bzw. berechneten Werte einfach nur leicht zeitverzögert an das Display weitergeleitet oder nicht schnell genug berechnet werden können. Unwahrscheinlich ist es hingegen, dass der Edge 305 prinzipiell andere Strecken aufzeichnet als angezeigt werden.

© 2007 Europa Technologies
Image © 2007 AeroWest
©2007 Google
Zeiger 32 U 557315.35 m O 5796644.76 m N Höhe 82 m
Übertragung 100%
Sichthöhe 170 m

Abbildung 27: Teststrecke 1.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Die aufgezeichneten Tracks haben jeweils nur sehr geringe Querabweichungen zu der genau eingemessenen Sollstrecke, wie hier in Abbildung 27 zu sehen ist.

© 2007 Europa Technologies
Image © 2007 AeroWest
©2007 Google
Zeiger 32 U 557308.98 m O 5796540.68 m N Höhe 81 m
Übertragung 100%
Sichthöhe 180 m

Abbildung 28: Teststrecke 1.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (blau)

Die maximale Abweichung aller Läufe senkrecht zur Sollstrecke beträgt gerade einmal 2,05 m, wobei Werte in dieser Größenordnung eher selten auftauchen. In Abbildung 28 ist sowohl dieses Maximum (ungefähr in Bildmitte) als auch eine Verschiebung des Anfangspunkts in nördliche Richtung zu sehen. Die Gesamtdistanz dieses Laufs beläuft sich wieder auf 504 m, da sich am anderen Ende der Strecke ebenfalls eine Verschiebung um etwa 5 m in gleicher Richtung ausmachen lässt. Bei diesem Track zeigt sich also eine eindeutig fehlerbehaftete absolute Positionierung, wobei die relativen Messungen wieder mit dem Sollwert übereinstimmen.

Bei der Durchführung der Test wurde auf eine möglichst gleichmäßige Geschwindigkeit geachtet. In Abbildung 29 zeigt sich so ein typischer Geschwindigkeitsverlauf über die Strecke. Hierbei kommt es lediglich zu Geschwindigkeitsvariationen bis $\pm$ 1 km/h. Betrachtet man die mittlere Sollgeschwindigkeit und die mittlere Ist-Geschwindigkeit, so erkennt man, dass diese fast identisch sind. Die Differenz beträgt nur 0,03 km/h, wobei sich die Sollgeschwindigkeit auf die Sollstrecke dividiert durch die tatsächlich verstrichene Zeit bezieht. Insgesamt kann man also eine sehr gleichmäßige Geschwindigkeit über die gesamte Strecke beobachten. Bei den Abweichungen ist es nun allerdings schwer eine Ursache zu benennen, da der Edge 305, im Gegensatz zur Anzeige in Echtzeit (eine Nachkommastelle), bis auf wenige Ausnahmen nur ganzzahlige Geschwindigkeiten aufzeichnet. Es existieren also drei Fehlerquellen: Eine unregelmäßige Laufgeschwindigkeit, Rundungsfehler oder Messfehler des Edge.

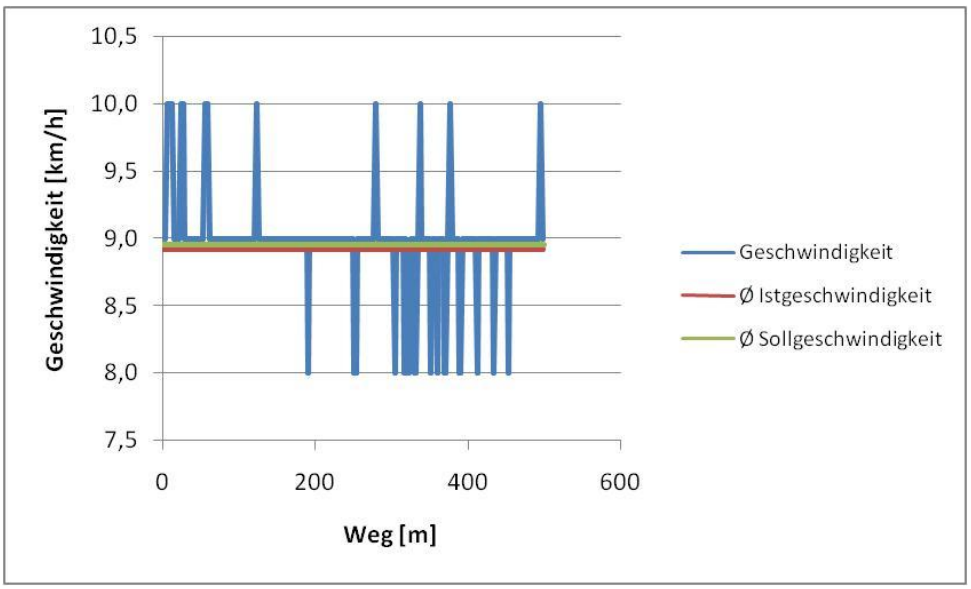


Abbildung 29: Teststrecke 1.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Der Höhenverlauf weist hier erheblich größere Schwankungen auf (siehe Abbildung 30). Der Höhenunterschied vom Start- bis zum Endpunkt beläuft sich auf Teststrecke 1.0 auf 1,17 m. Diese Steigung lässt sich dem Graphen auch grundsätzlich entnehmen. Die Höhe variiert jedoch sehr stark, teilweise bis zu 4 m. Dies spricht eher für eine dauerhafte Bestimmung der Höhenkomponente per GPS. Plötzliche Luftdruckänderungen, aus denen ein solcher Verlauf resultieren würde, sind hier nicht zu erwarten. Dadurch ist ein Einsatz der barometrischen Höhenmessung in diesem Fall stark zu bezweifeln.

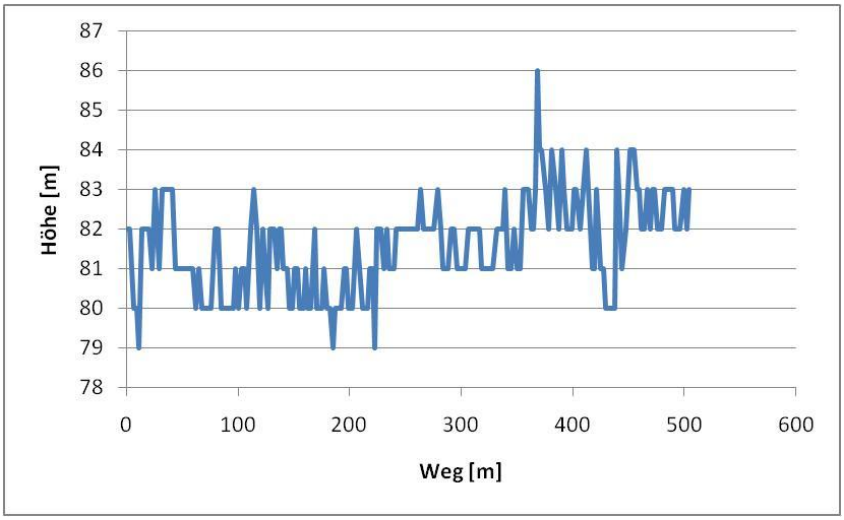


Abbildung 30: Teststrecke 1.0 – Höhenverlauf

Teststrecke 2.0 (eingeschränkte Sicht durch Gebäude)

Anschließend wurden die Geräte auf Teststrecke 2.0 unter eingeschränkter Sicht durch Gebäude und somit unter verschlechterten Bedingungen getestet. In Abbildung 31 sind die Ergebnisse der Läufe aufgelistet. Es ergeben sich ein Mittelwert von 816,75 m und eine Standardabweichung von 2,68 m. In diesem Fall wird nur noch eine Streckengenauigkeit von > 98,8 % erreicht. Besonders auffällig ist, dass die gemessenen Distanzen bei allen Läufen kleiner sind als die Sollstrecke, während die aufgezeichneten Strecken im Mittel 827,75 m erreichen und so im Endeffekt genauer sind (> 99,2 %). Verglichen mit der Referenz liegen hierbei angezeigte und aufgezeichnete Werte bereits bis zu 15 m auseinander (siehe Abbildung 32). Eine mögliche Ursache dafür könnte ein durch den verschlechterten Empfang hervorgerufener erhöhter Rechenaufwand sein, wodurch tatsächliche Werte später an die Anzeigeschnittstelle weitergeleitet werden.

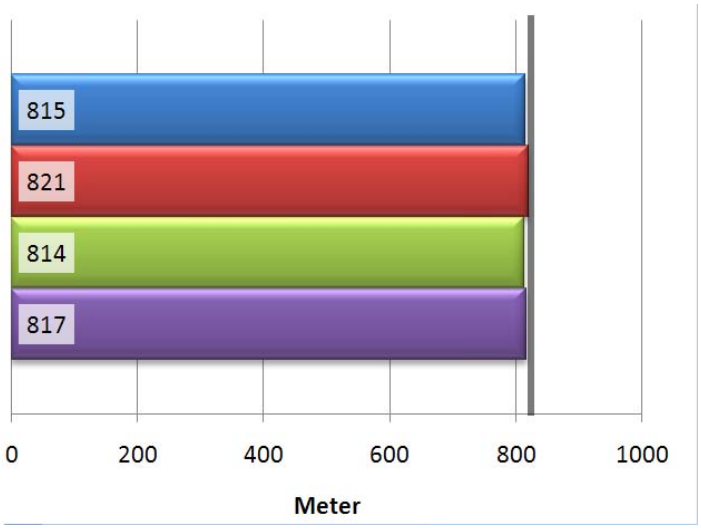


Abbildung 31: Teststrecke 2.0 – Angezeigte Strecken (Sollstrecke 824 m)

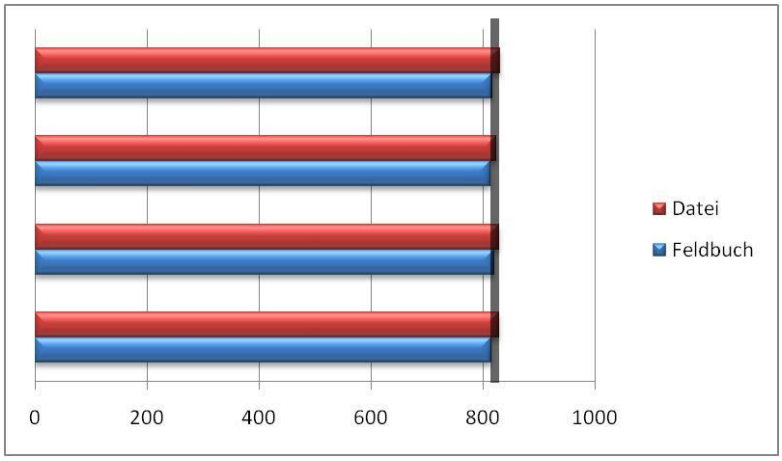


Abbildung 32: Teststrecke 2.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Bei einer Betrachtung der aufgezeichneten Tracks (siehe Abbildung 33) wird deutlich, dass eingeschränkte Sichten, wie erwartet, einen Einfluss auf die Genauigkeit haben. So liegen nun bereits Querabweichungen bis maximal 25 m vor. Im nördlichen Teil der Strecke kommt es zu einer regelrechten Verschiebung des gesamten Streckenverlaufs. Dies ist durch die Konstellation bzw. Anzahl der Satelliten zu erklären: Die Sicht in südliche Richtung ist hier weitestgehend verdeckt. Da die GPS-Satelliten sich auf Umlaufbahnen mit einer Inklination von 55° bewegen, stehen von Deutschland aus gesehen mehr Satelliten im Süden zur Verfügung. Außerdem befinden sich die geostationären EGNOS-Satelliten über Zentralafrika, von wo aus Signale, und damit Korrekturdaten, nur unter einer Elevation von maximal 35° empfangen werden können. Dies erklärt auch die sehr genaue Überlagerung von Sollstrecke und aufgezeichnetem Track im südlichen Teil der Strecke (kaum Abschattungen in Richtung Süden).

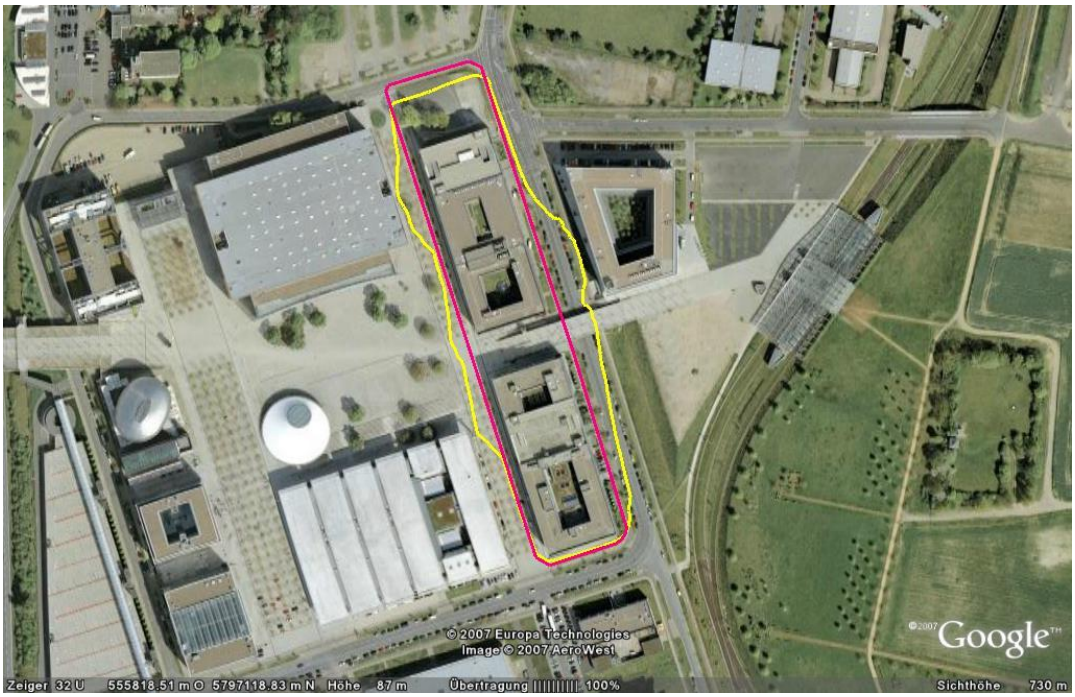

© 2007 Europa Technologies
Image © 2007 AeroWest
©2007 Google
Zeiger 32 U 555818.51 m O 5797118.83 m N Höhe 87 m Übertragung 100%
Sichthöhe 730 m

Abbildung 33: Teststrecke 2.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

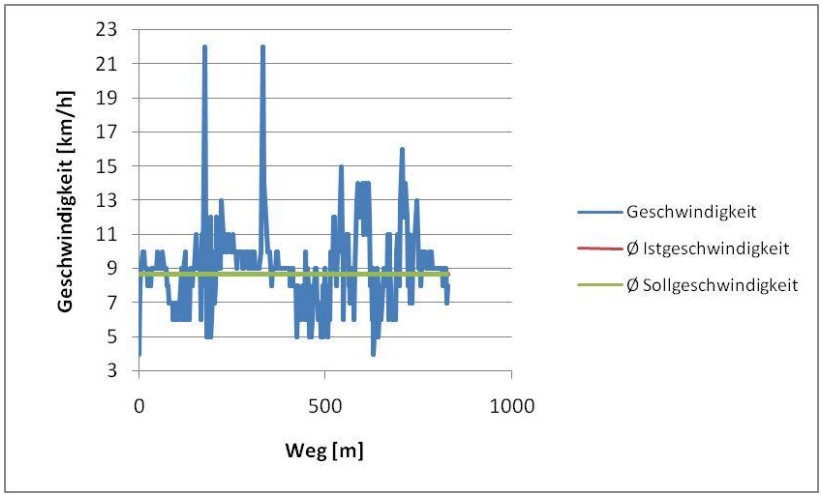


Abbildung 34: Teststrecke 2.0 – Geschwindigkeitsverlauf

In Abbildung 34 ist die Geschwindigkeitskurve eines Laufs auf Teststrecke 2.0 dargestellt. Die mittlere Geschwindigkeit entspricht zwar der mittleren Sollgeschwindigkeit, besitzt jedoch eine recht hohe Standardabweichung in beide Richtungen, was durch die Abschattungen erklärt werden kann. Besonders auffällig sind jedoch 2 bis 3 Schwankungen der Geschwindigkeit, die bei allen Durchläufen an den gleichen Stellen des Kurses auftreten. Das erste Maximum ist kurz vor dem Fußgängerüberweg in Abbildung 35 erreicht. Es ist auf die bis zu dieser Stelle schlechte GPS-Genauigkeit und die plötzliche Genauigkeitssteigerung durch besseren Empfang zurückzuführen. Während die bestimmten Positionen durch die vorangegangenen Abschattungen zu beiden Seiten sehr ungenau waren, resultierten die Geschwindigkeiten aus relativen Messungen und waren dementsprechend genau. Aufgrund der abrupten Verbesserung des Empfangs durch die plötzlich zur Verfügung stehenden Sichten direkt vor dem Überweg wurde die absolute Position wieder präziser bestimmt, wodurch dieser Sprung auf 22 km/h zu erklären ist. Sehr schön zu sehen ist dieser Fall auch in Abbildung 36. Vor der Kurve weicht der Track noch stark von der Sollstrecke ab, doch sofort nach Verbesserung der Empfangsbedingungen kommt es zu einer „Anpassung“, woraus ein plötzlicher Geschwindigkeitszuwachs hervorgeht.

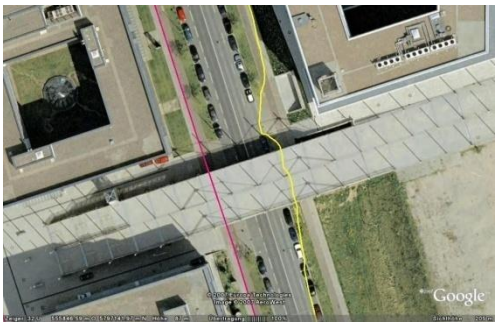


Abbildung 35: Fußgängerüberweg

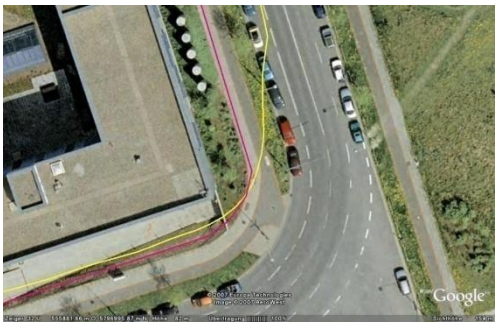


Abbildung 36: Kurve im südlichen Teil

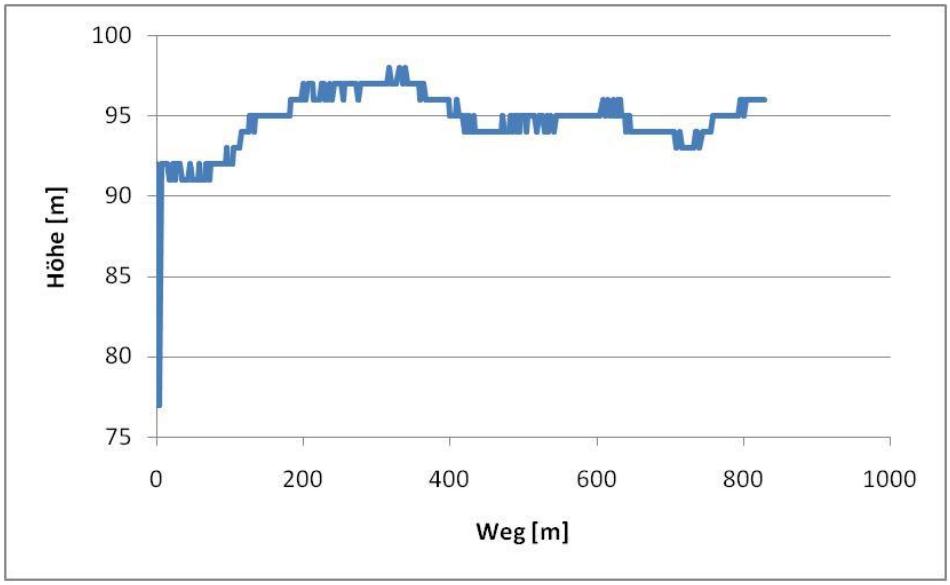


Abbildung 37: Teststrecke 2.0 – Höhenverlauf

Das Höhenprofil, welches in Abbildung 37 dargestellt ist, scheint von den höheren Variationen der Werte durch eingeschränkte Sicht nicht betroffen zu sein, obwohl die Höhenkomponente per GPS normalerweise wesentlich ungenauer bestimmbar ist als die Lagekoordinaten. Möglicherweise wird hier bereits der barometrische Höhenmesser für relative Höhenmessungen hinzugezogen, der die absolute Höhe so „stabilisiert“. Lediglich am Anfang der Aufzeichnung liegt die gemessene Höhe bei allen Läufen mindestens 10 m unter dem Niveau des gesamten Kurses.

Teststrecke 2.1 (eingeschränkte Sicht durch Bäume)

Auf Teststrecke 2.1 kam es durch Bäume zu kontinuierlichen Abschattungen zu beiden Seiten der Allee. Die angezeigten Strecken sind in Abbildung 38 visualisiert. Der Mittelwert beträgt 1001,75 m und die Standardabweichung 4,92 m. Es wird eine Streckengenauigkeit > 99 % erreicht.

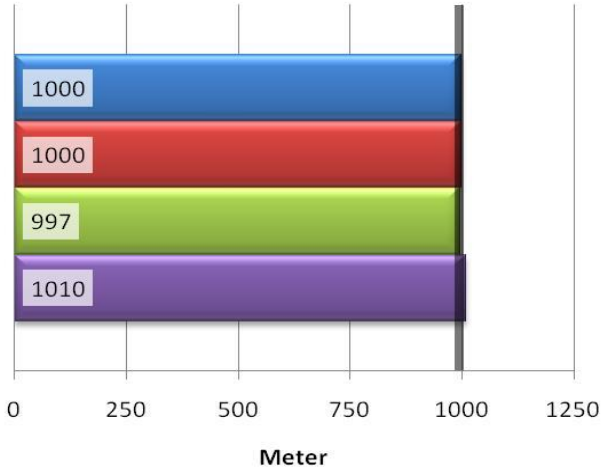


Abbildung 38: Teststrecke 2.1 – Angezeigte Strecken

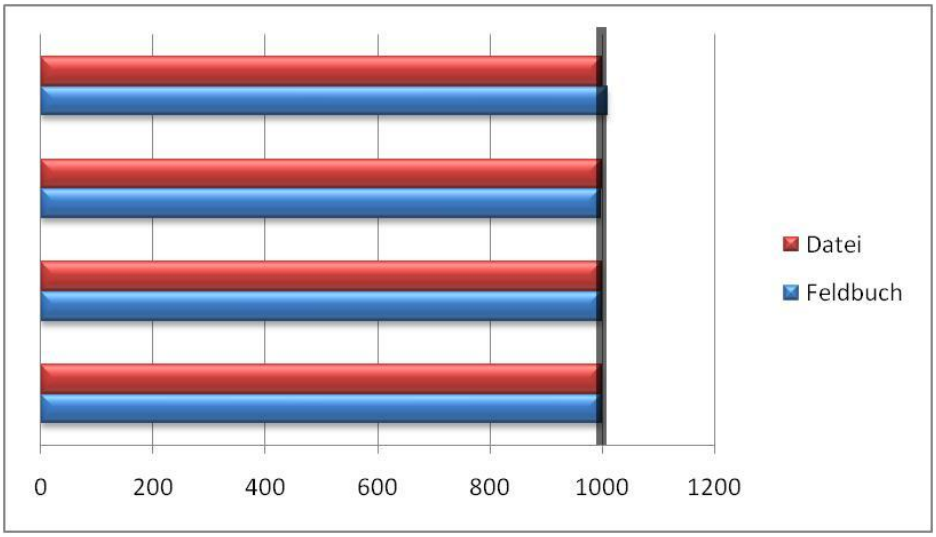


Abbildung 39: Teststrecke 2.1 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Die Differenz zwischen aufgezeichnetem und angezeigtem Wert beträgt maximal 10 m (siehe Abbildung 39), wobei der Edge Strecken ab 1000 m nur noch auf ganze 10 m anzeigt. Alle aufgezeichneten Distanzen liegen bei exakt 1000 m.

Die Sollstrecke und die tatsächlich aufgezeichnete Strecke fallen meist direkt zusammen oder verlaufen wenige Dezimeter nebeneinander (siehe Abbildung 40). Die maximale Querabweichung beträgt ca. 8 m, wobei solche Größenordnungen eher die Ausnahme darstellen. Scheinbar werden die GPS-Signale durch die Laubbäume nur leicht

abgeschwächt und sind mit Empfängern mit höherer Eingangsempfindlichkeit (SiRFstarIII im Edge 305) wohl fast problemlos zu empfangen.

© 2007 Europa Technologies
Image © 2007 AeroWest
Google
Zeiger 32 U 548597.04 m O 5803926.60 m N Höhe 53 m Übertragung 100% Sichthöhe 217 m

Abbildung 40: Teststrecke 2.1 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

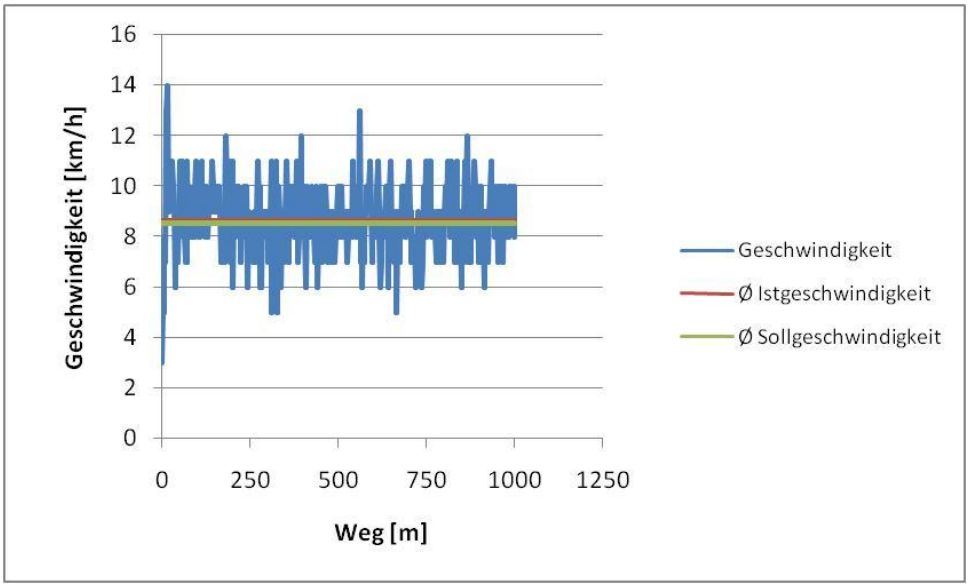


Abbildung 41: Teststrecke 2.1 – Geschwindigkeitsverlauf

Bei den gemessenen Geschwindigkeiten in Abbildung 41 zeigt sich ein für diese Bedingungen sehr gleichmäßiger Verlauf, der Schwankungen im Bereich zwischen 1…3 km/h aufweist. Zu Beginn der Läufe kommt es jedoch immer erst zu einer zu niedrigen gefolgt von einer zu hohen Geschwindigkeit, was möglicherweise mit den nicht optimalen Bedingungen für eine Initialisierung zusammenhängen könnte. Die mittlere Sollgeschwindigkeit und die mittlere aufgezeichnete Geschwindigkeit liegen in diesem Beispiel (Abbildung 41) nur 0,06 km/h auseinander.

Der Höhenunterschied von etwa 2,30 m über die Distanz von 1000 m ist auch aus den aufgezeichneten Werten (Abbildung 42) ersichtlich. Es tritt jedoch dasselbe Phänomen wie bei Teststrecke 2.0 auf: Die zu Beginn der Aufzeichnung registrierten Höhen weichen teilweise bis zu 10 m von den darauffolgenden Werten ab. Außerdem scheint auch hier der barometrische Höhenmesser zur Stabilisierung des Höhenniveaus beizutragen.

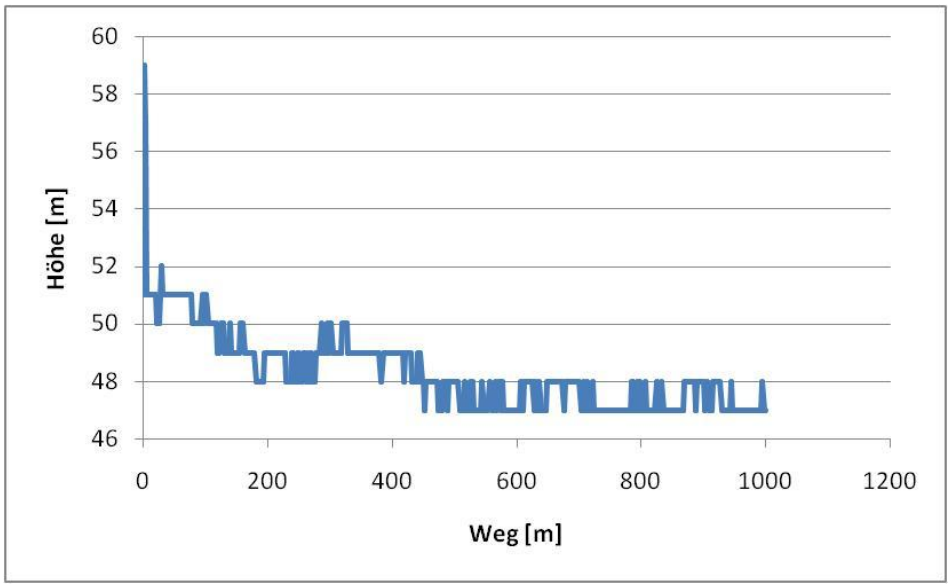


Abbildung 42: Teststrecke 2.1 – Höhenverlauf

Teststrecke 3.0 (stark eingeschränkte Sicht durch Wald)

Teststrecke 3.0 befindet sich in einem Waldstück und bietet somit stark eingeschränkte Sichten. Die angezeigten Distanzen in Abbildung 43 scheinen dadurch wenig beeinflusst worden zu sein. Der Mittelwert beträgt 488 m und die Standardabweichung liegt bei 21,6 m (Streckengenauigkeit > 90,2 %). Dies ändert sich jedoch, wenn man den zweiten Lauf aus der Genauigkeitsbetrachtung herausnimmt (Mittelwert: 500,33 m, Standardabweichung 3,78 m und Streckengenauigkeit > 99 %). Da man anhand der Aufzeichnungen des Edge auf keinerlei Ursachen schließen kann, ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um zusätzlich schlechtere Bedingungen (Konstellation/Anzahl der Satelliten) handelte, da der besagte Lauf beispielsweise auch in Süd-Nord-Richtung durchgeführt wurde. Letzteres ist bei dem vierten Lauf auch der Fall, doch dieser liegt hingegen bei 99,4 % der Sollstrecke von 500 m.

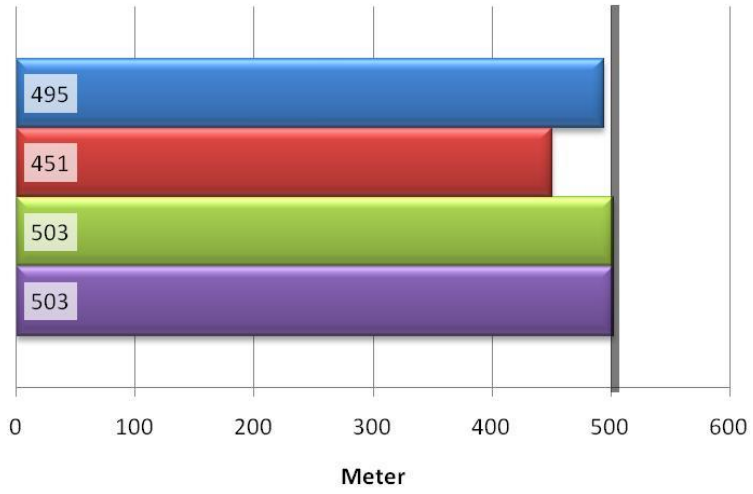


Abbildung 43: Teststrecke 3.0 – Angezeigte Strecken

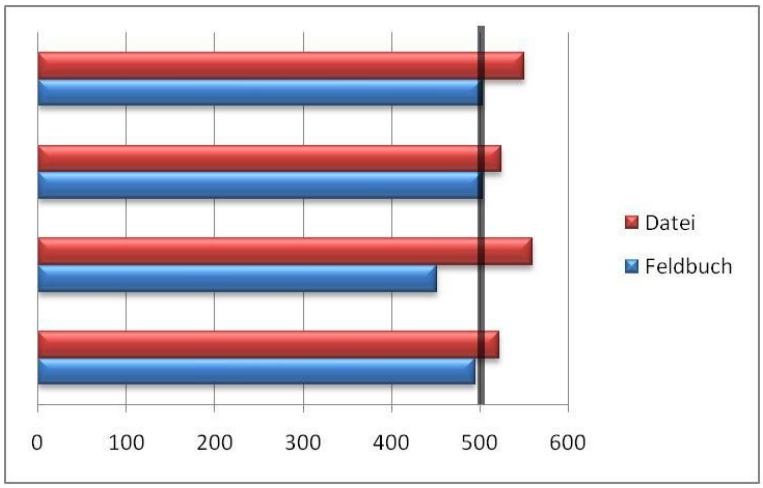


Abbildung 44: Teststrecke 3.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Die Tests im Wald unterstützen die Vermutung der verlängerten Rechenzeit bei verschlechterten Bedingungen und die damit verbundene Verzögerung der Anzeige (siehe Abbildung 44). Der soeben besprochene zweite Lauf scheint davon besonders betroffen zu sein. Hier ergibt sich eine Differenz von 108 m zwischen den aufgezeichneten und den angezeigten Distanzen, was die These der zusätzlich schlechteren Bedingungen noch unterstreicht. Aber auch bei allen anderen Läufen ergeben sich Unterschiede von bis zu 50 m. Damit lässt sich sagen, dass die registrierten Messwerte im Wald schlechter sind als die angezeigten Distanzen, was bis dahin noch nicht der Fall war.

In Abbildung 45 weicht der aufgezeichnete Track nicht großartig von der eigentlichen Strecke ab. Die maximale Querabweichung beträgt hierbei 7,75 m, was im selben Bereich liegt wie bei Teststrecke 2.1. Während des ganzen Verlaufs deutet nichts auf Signalunterbrechungen oder sogar Signalabbrüche hin. Die Fehler in den Strecken

kommen hauptsächlich durch Verfehlungen des Start- und Zielpunktes und der daraus resultierenden Vergrößerung der Länge (siehe Abbildung 46) sowie durch kleine Sprünge, wie in der Bildmitte von Abbildung 45, zustande. Diese tauchen hier erstmalig auf.

Abbildung 45: Teststrecke 3.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Abbildung 46: Teststrecke 3.0 – Verfehlung des Zielpunktes

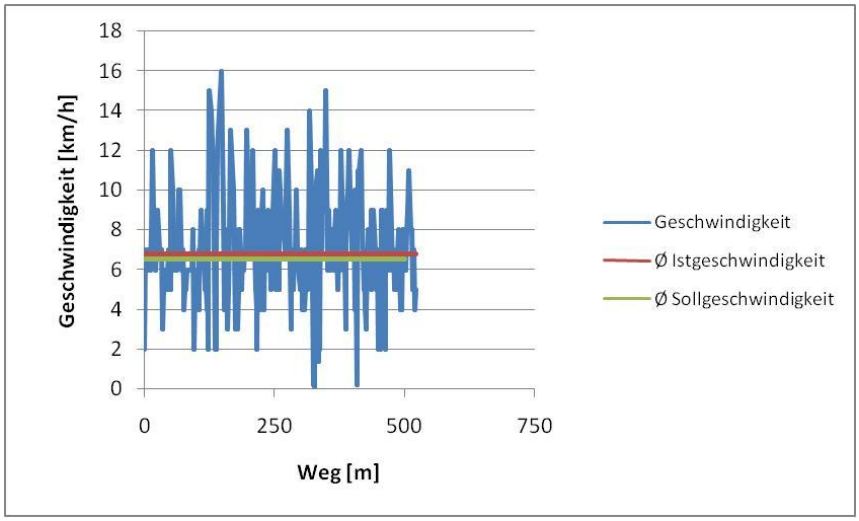


Abbildung 47: Teststrecke 3.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Wie zu erwarten war, wurden während der Läufe stark variierende Geschwindigkeiten aufgezeichnet (Abbildung 47), die bis zu 9 km/h vom Mittelwert abweichen. Der Vergleich zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit offenbart eine Differenz von 0,29 km/h. Dies liegt weit über der unter optimalen Bedingungen erreichbaren geschätzten Genauigkeit von 0,1 km/h.

Besonders aussagekräftig gestaltet sich jedoch die beispielhafte Betrachtung eines Höhenverlaufs wie in Abbildung 48. Die wenigen Abweichungen von den 70 m liegen in im Bereich zwischen 1…2 m. Verglichen mit dem von dieser Strecke dargestellten Geschwindigkeitsverlauf und der gemessenen Distanzen ist ein derartiger Höhenverlauf höchst unwahrscheinlich. Es kann also auf jeden Fall von einer Nutzung des barometrischen Höhenmessers ausgegangen werden. Dieser kommt vermutlich ähnlich wie der GSC10 Geschwindigkeitssensor (Fahrrad) erst dann zum Einsatz, wenn die empfangenen GPS-Signale schwach sind oder ganz ausfallen. Wie bei den vorangegangenen Tests ist auch hier ein Sprung von mehreren Metern zu Beginn zu beobachten.

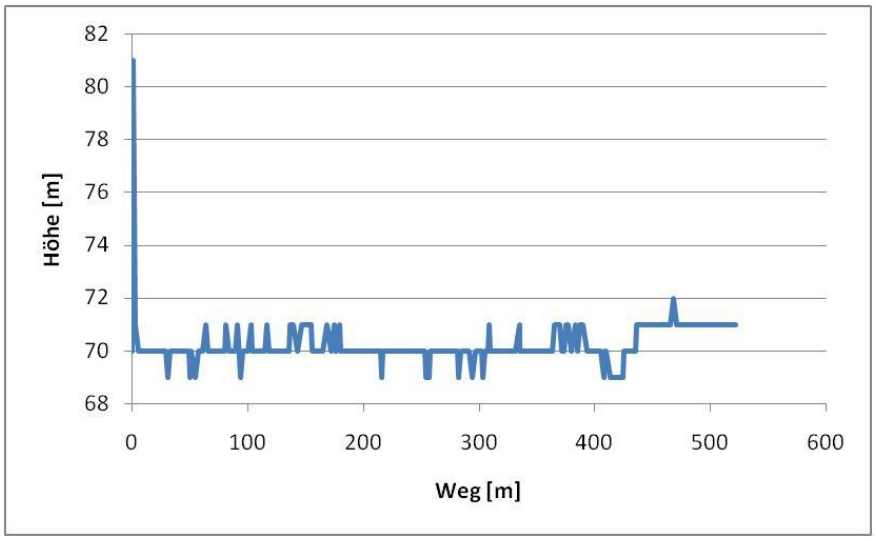


Abbildung 48: Teststrecke 3.0 – Höhenverlauf

Teststrecke 8.0 (kurviger Streckenverlauf)

Teststrecke 8.0 bietet mit verschiedenen Kurventypen, plötzlichen Spurwechseln sowie einer 180°-Wende viele Möglichkeiten zur Genauigkeitsuntersuchung.

Abbildung 49: Teststrecke 8.0 - Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Abbildung 49 zeigt einen Überblick über die gesamte Strecke 8.0. Dazu wurde ein aufgezeichneter Track (gelb) beispielhaft ausgewählt, um ihn mit der Sollstrecke (pink) zu vergleichen. Wie hier ersichtlich wird, kommt es nur an wenigen Stellen überhaupt zu erwähnenswerten Abweichungen der aufgezeichneten Streckenpunkte zu der vorher präzise eingemessenen Sollstrecke (maximale Querabweichung 5,11 m). Um Aussagen über eingesetzte Berechnungsverfahren und Filter treffen zu können, wurden dafür spezielle Szenarien angelegt. In Abbildung 50 kommt es während des Laufs zur 90°-Drehung in einem Punkt. Der Verlauf der Kurve wird hier leicht geglättet, es kommt jedoch weder zu einem sogenannten „Drift“, noch werden die Kurve charakterisierende Punkte „abgeschnitten“. In Abbildung 51 kann man den gleichen Effekt beobachten. In diesem Fall handelt es sich jedoch um eine leicht abgerundete Kurve, die über 2 Punkte definiert ist. Im Anschluss an diese Richtungsänderung sieht man die maximale Querabweichung, wobei an dieser Stelle auch die vermeintlich größten Abschattungen in südliche Richtung vorliegen.

Abbildung 50: 90°-Drehungen in einem Punkt

Abbildung 51: Abgerundete Kurve (2 Punkte)

Abbildung 52: Plötzlicher Spurwechsel

Abbildung 53: Stark abgerundete Kurve

Auch bei einem plötzlichen Spurwechsel, wie in Abbildung 52, zeichnet der Edge 305 sehr präzise Koordinaten auf. Es kommt dabei zu minimalen Differenzen zur Sollstrecke (< 70 cm). Bei einer langgezogenen, stark abgerundeten Kurve (siehe Abbildung 53) kommt es zu einer leichten Drift, dessen Ursache aber auch die geringfügig eingeschränkte Sicht (durch die angrenzenden Bäume) sein könnte. Abbildung 54 zeigt eine 180°-Wende in einem Punkt. Das schnelle Umkehren der Richtung wird jedoch nicht sofort erkannt, so dass der aufgezeichnete Track 3,45 m weiter in den Pavillon hineinragt als die Sollstrecke.

Das gute Kurvenverhalten und die hohe Präzision des aufgezeichneten Tracks bzw. die nur sehr kleinen Abweichungen zur Sollstrecke sind im ganzen Streckenverlauf ersichtlich. In den Kurven lassen sich die einzelnen aufgezeichneten Koordinaten mit einer Aktualisierungsrate von 1 Sekunde erkennen, was für eine nur sehr geringe Glättung spricht. In Abbildung 51 wird die Richtungsänderung beispielsweise mit 5 einzelnen Punkten beschrieben.

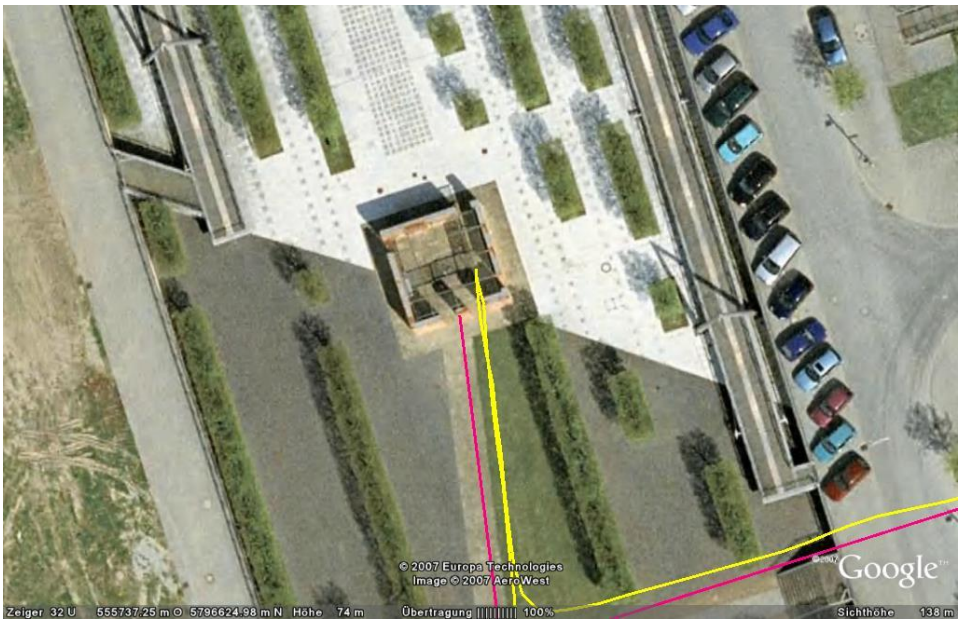

© 2007 Europa Technologies
Image © 2007 AeroWest
Google
Zeiger 32 U 555737.25 m O 5796624.98 m N Höhe 74 m Übertragung 100% Sichthöhe 138 m

Abbildung 54: Schnelle 180°-Wende in einem Punkt

Auskunft über die Genauigkeit des Geschwindigkeits- und Distanzmessers Garmin Edge 305 sollten aber vor allen Dingen die angezeigten Strecken geben (Abbildung 55). Der Mittelwert beträgt 1076 m (1081,78 m Solldistanz) und die Standardabweichung liegt bei 10,20 m, was zu einer Streckengenauigkeit > 98,1 % führt. Auch hier kommt es wieder zu Abweichungen zwischen angezeigter und aufgezeichneter Distanz (siehe Abbildung 56).

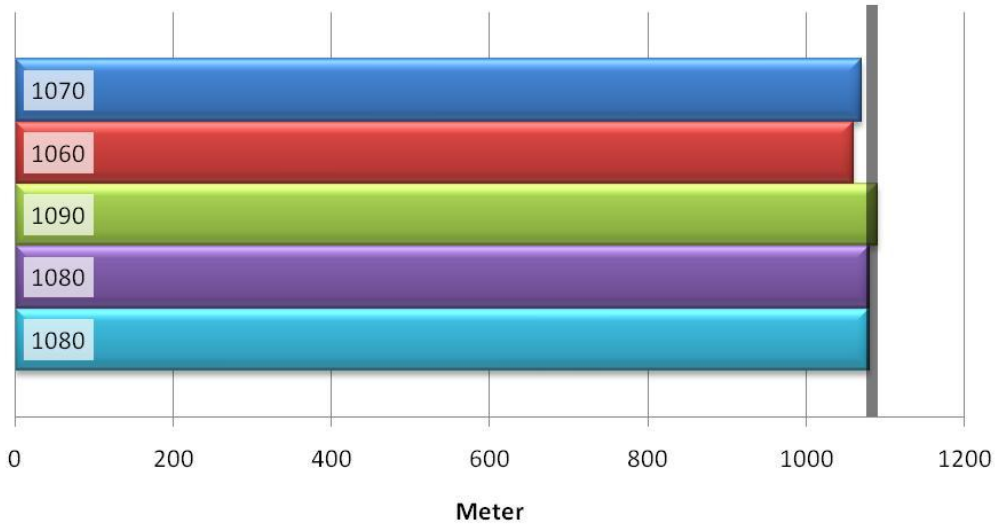


Abbildung 55: Teststrecke 8.0 – Angezeigte Strecken

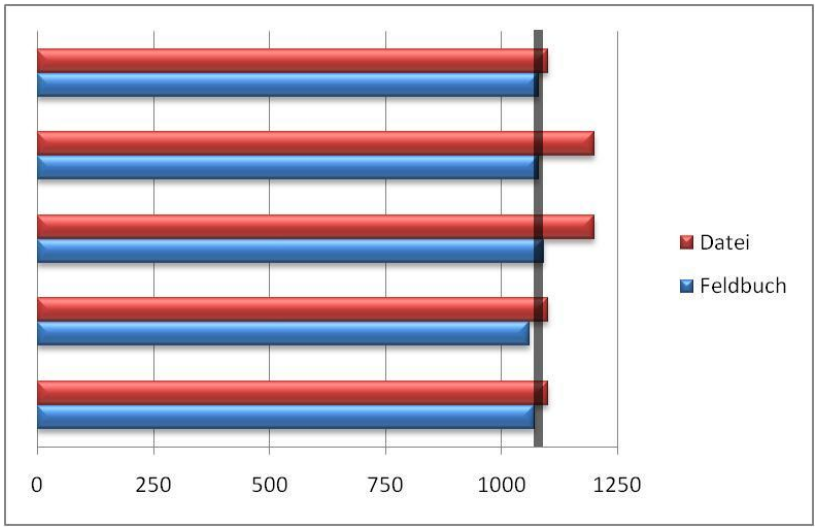


Abbildung 56: Teststrecke 8.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

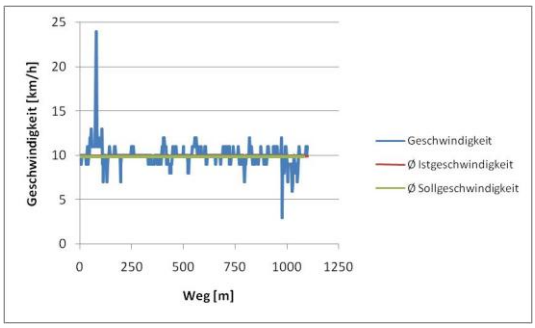


Abbildung 57: Teststrecke 8.0 - Geschwindigkeitsverlauf

Abbildung 58: Plötzliche Signalverbesserung

In Abbildung 57 wird der Geschwindigkeitsverlauf über die gesamte Strecke dargestellt, wobei es wieder zu einem Maximum kommt, dessen Ursache dieselbe wie bei Teststrecke 2.0 ist: Eine schlagartige Verbesserung der Empfangsbedingungen sorgt für eine Korrektur der absoluten Position, was zu einem Geschwindigkeitssprung in dieser Größenordnung führen kann. Abbildung 58 zeigt den besagten Fall. Hier kommt es zunächst noch zu Abschattungen durch den ehemaligen Niederländischen Pavillon (links). Die plötzliche Korrektur wird durch den Verlauf des Tracks (gelb) ersichtlich.

Der in Abbildung 59 beispielhaft dargestellte Höhenverlauf weist erneut einen starken Sprung zu Beginn der Läufe auf. Die auftretenden Variationen nehmen jedoch nur recht kleine Werte an. Der weitere Verlauf entspricht daraufhin dem tatsächlichen Höhenprofil auf dieser Strecke.

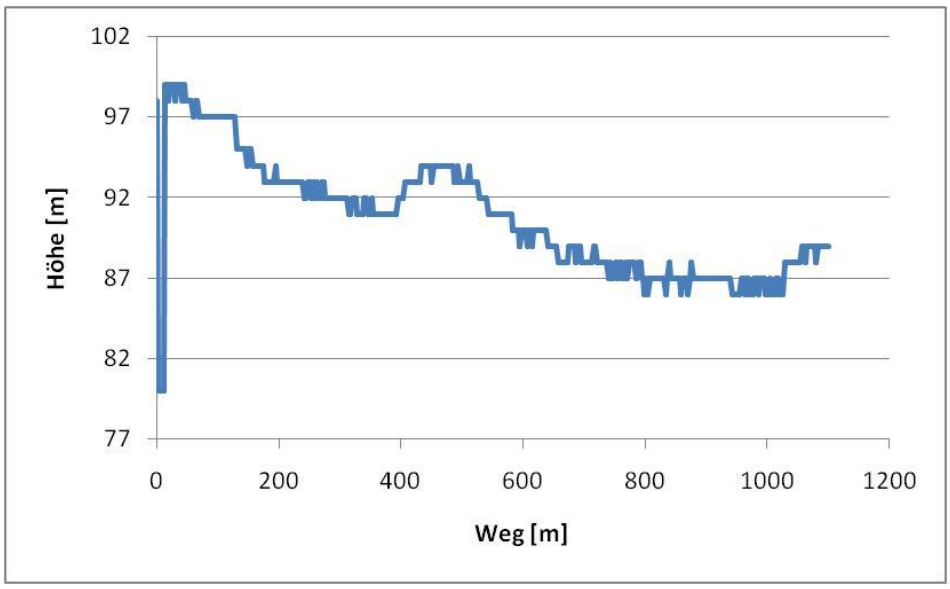


Abbildung 59: Teststrecke 8.0 - Höhenverlauf

Teststrecke 9.0/9.1 (Signalunterbrechung/-abbruch)

Auf den Teststrecken 9.0 und 9.1 sollte die Genauigkeit bei Signalabbruch bzw. Signalunterbrechung untersucht werden. Dafür wurden zwei verschiedene Brücken gewählt, die für den gewünschten Effekt sorgen sollten (siehe Teststrecken). Die Tests werden in zwei Arten unterteilt: Der Brücken- bzw. Tunneldurchlauf zur Simulation einer kurzzeitigen Signalunterbrechung und das Anhalten unter der jeweiligen Brückenmitte um einen Signalabbruch zu erzeugen. Bei letzterem ging es darum, das weitere Verhalten der Geräte innerhalb von 30 Sekunden nach diesem Signalabbruch zu analysieren.

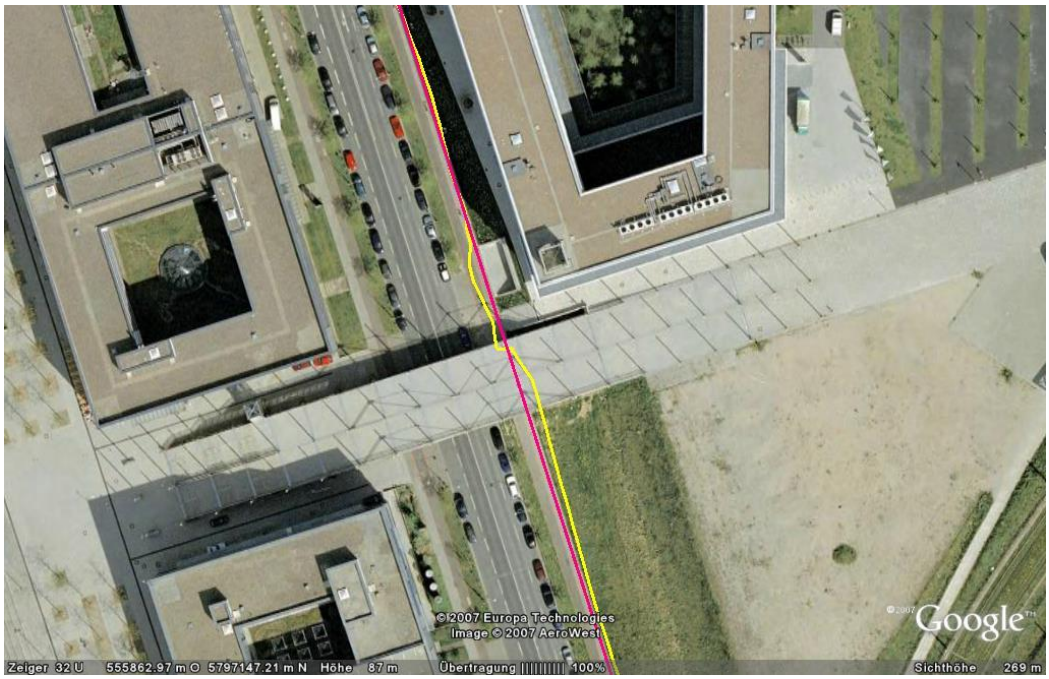

© 2007 Europa Technologies
Image © 2007 AeroWest
Google
Zeiger 32 U 555862.97 m O 5797147.21 m N Höhe 87 m Übertragung 100% Sichthöhe 269 m

Abbildung 60: Teststrecke 9.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

In Abbildung 60 wird einer der Tunneldurchläufe dargestellt. Durch die vorübergehende Signalunterbrechung kommt es zwischenzeitlich zu größeren Abweichungen von der Sollstrecke (pink). Nachdem die Brücke passiert ist, kommt es auf den darauffolgenden 20 m weiterhin zu Unsicherheiten, was sich auch im Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 61 bemerkbar macht. Schon bei schwächer werdendem Empfang kommt es zu größeren Schwankungen bis 4 km/h. Wenn das Signal dann komplett unterbrochen ist, wird die Geschwindigkeit als stark verlangsamt aufgezeichnet. Auch hier wird ersichtlich, dass sich die Abweichungen vom Mittelwert erst etwa 20 m nach dem Fußgängerüberweg wieder verringern.

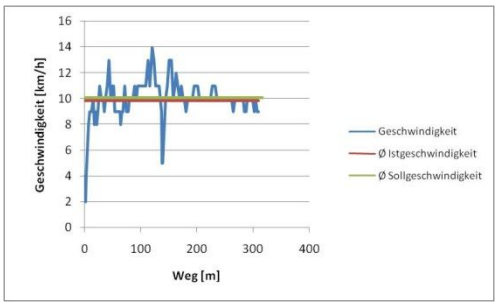


Abbildung 61: Teststrecke 9.0 – Geschwindigkeitsverlauf (Durchlauf)

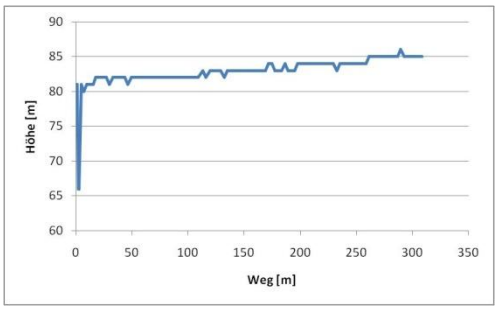


Abbildung 62: Teststrecke 9.0 – Höhenverlauf (Durchlauf)

Abgesehen von dem Höhensprung zu Beginn der Aufzeichnung in Abbildung 62 hat eine Signalunterbrechung keinen Einfluss auf die Höhe, was zum wiederholten Male für den Einsatz des barometrischen Höhenmessers spricht.

Alle angezeigten Strecken (siehe Abbildung 63) werden, im Vergleich zur Sollstrecke (317 m), zu kurz gemessen. Die Streckengenauigkeit liegt nach Signalunterbrechung nur noch bei > 95,9 %. Bei Teststrecke 9.1 hingegen kann fast von einem „normalen“ Verhalten die Rede sein. Es wird eine streckenabhängige Genauigkeit von > 98,6 % der Solldistanz von 277 m erreicht (siehe Abbildung 64). Dieses unterschiedliche Verhalten kann eine Folge der zusätzlichen eingeschränkten Sicht auf Strecke 9.0 sein, wohingegen bei Strecke 9.1, abgesehen von der Brücke, optimale Bedingungen herrschen.

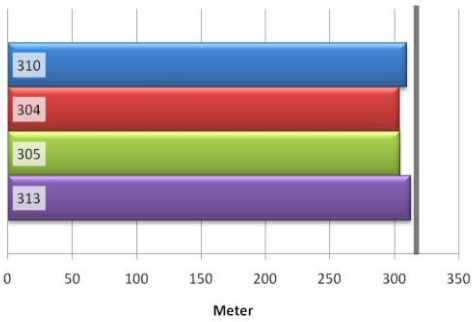


Abbildung 63: Teststrecke 9.0 – Angezeigte Strecken

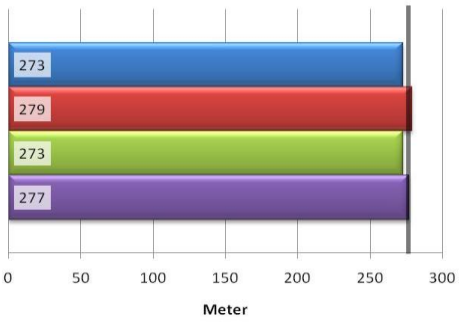


Abbildung 64: Teststrecke 9.1 – Angezeigte Strecken

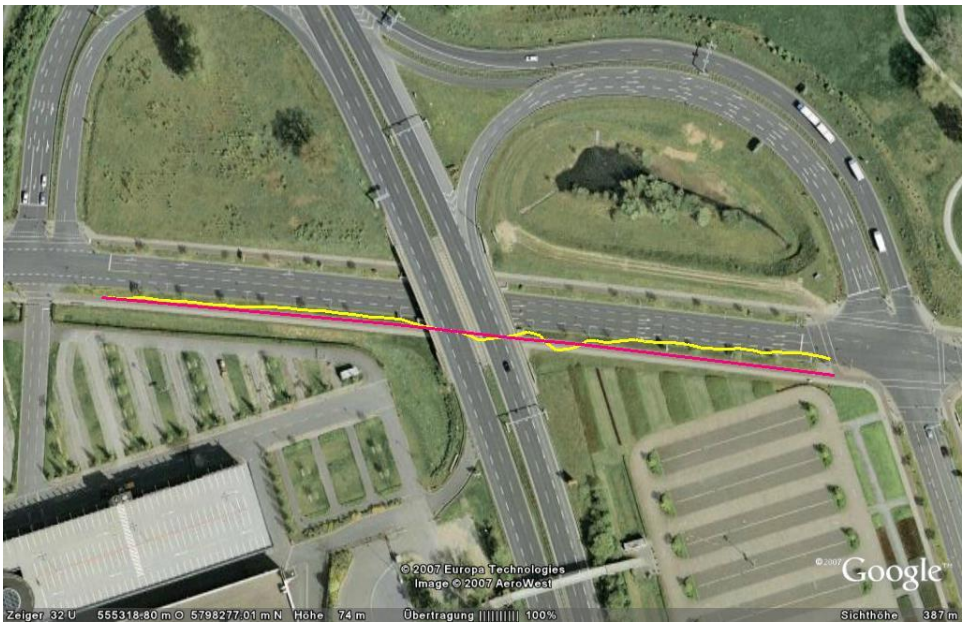

© 2007 Europa Technologies
Image © 2007 AeroWest
Google
Zeiger 32 U 555318.80 m O 5798277.01 m N Höhe 74 m Übertragung 100% Sichthöhe 387 m

Abbildung 65: Teststrecke 9.1 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Die Brücke des Messeschnellwegs, die den Fußweg entlang der Hermesallee, und damit die Teststrecke 9.1, überführt hat an dieser Stelle eine Breite von ca. 35 m. Hier kommt es zu einer längeren Signalunterbrechung. In Abbildung 65 lässt sich bezüglich des aufgezeichneten Tracks ein ähnlicher Effekt wie auf Teststrecke 9.0 beobachten. Ab dem Moment der Unterbrechung kommt es zu Unsicherheiten. Die Position wird zwar weiterhin vorausberechnet, erfährt aber anscheinend diverse Störeinflüsse, so dass es zu keiner linearen Prädiktion kommt. Im Gegensatz zur Teststrecke 9.0 verringern sich die Querabweichungen zur Sollstrecke nach Wiedererlangen des Empfangs jedoch nicht. Abbildung 66 zeigt einen typischen Geschwindigkeitsverlauf. Hier wird das Tempo wie zuvor erst abgebremst und nach dem Ende der simulierten Signalunterbrechung wieder stark beschleunigt, was dadurch zu erklären ist, dass die vorausberechnete Strecke immer mehr abnimmt. Ist daraufhin wieder eine Positionierung möglich, entsteht ein Sprung in der Distanz, wodurch auch die Geschwindigkeit betroffen ist, da sich diese aus der Strecke dividiert durch die Zeit berechnet.

Wie aus Abbildung 67 hervorgeht, scheint die Höhenkomponente auch von einer längeren Signalunterbrechung nicht betroffen zu sein.

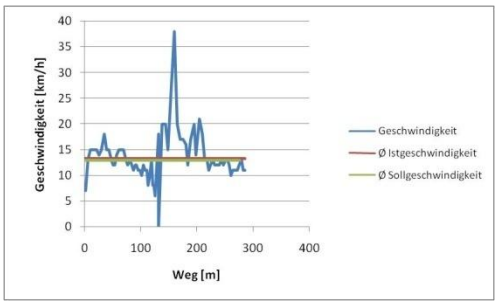


Abbildung 66: Teststrecke 9.1 – Geschwindigkeitsverlauf (Durchlauf)

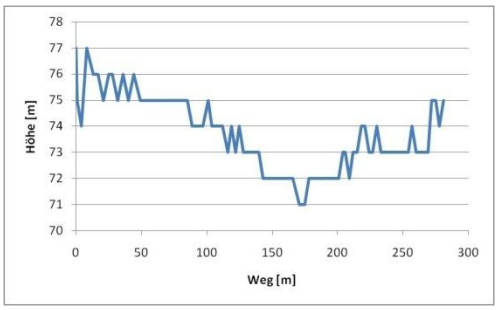


Abbildung 67: Teststrecke 9.1 – Höhenverlauf (Durchlauf)

Auf beiden Strecken lässt sich nun auch noch das Verhalten der Strecken bei geplantem Signalabbruch untersuchen. Während Abbildung 68 und Abbildung 69 einen der aufgezeichneten Streckenverläufe zeigen, können die dazugehörigen Werte aus Abbildung 70 und Abbildung 71 entnommen werden. Bei den angezeigten Strecken ist zu erkennen, dass diese nach den 30 Sekunden Standzeit einfach weiter vorausberechnet und so, mit Ausnahme einer Messung, größer geworden sind. Das Ausmaß der Prädiktion ist dabei abhängig von der Geschwindigkeit vor dem Signalabbruch. Die größte Differenz zwischen der Distanz bis zur Tunnelmitte und der angezeigten Strecke nach 30 Sekunden ohne Signal besitzt der dritte Wert (siehe Abbildung 71), welcher auch beispielhaft in Abbildung 69 dargestellt ist. Hierbei wurden 64 m vorausberechnet. Zum Vergleich: Beim zweiten Lauf war die Geschwindigkeit vorm Signalabbruch 0,2 km/h niedriger als beim dritten Lauf, wodurch 40 m weniger (insgesamt 24 m) prädiziert wurden.

Betrachtet man die Geschwindigkeitsverläufe über die Zeit, so stellt Abbildung 72 den „Normalfall“ dar. Nach dem Signalabbruch kommt es noch zu einigen Unsicherheiten und fehlerhaften Vorausberechnungen in meist hoher Größenordnung, bevor die Geschwindigkeit dann auf 0 km/h gesetzt wird. Abbildung 73 zeigt jedoch nach Signalabbruch eine konstante Geschwindigkeit über die komplette Zeit.

Die beispielhaften Höhenverläufe in Abbildung 74 und Abbildung 75 weisen kaum noch Schwankungen auf, nachdem es zur kompletten Abschattung kommt. Während man in Abbildung 74 noch von einer ebenso prädizierten Höhenkomponente ausgehen könnte, scheint es offensichtlich zu sein, dass der barometrische Höhenmesser in Abbildung 75 die Messung der Höhe übernimmt.

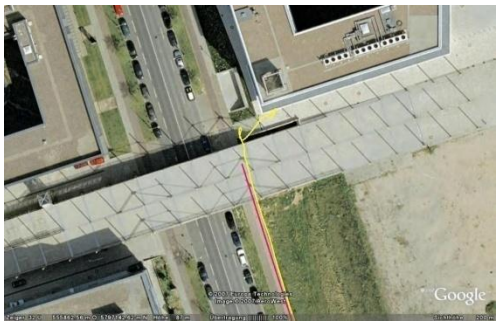


Abbildung 68: Teststrecke 9.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

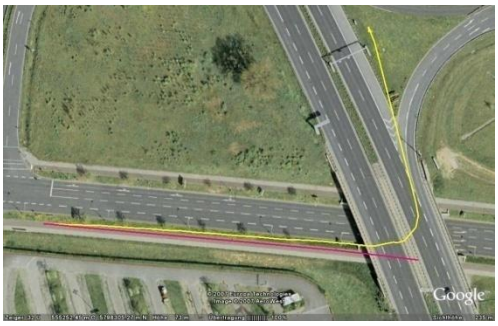


Abbildung 69: Teststrecke 9.1 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

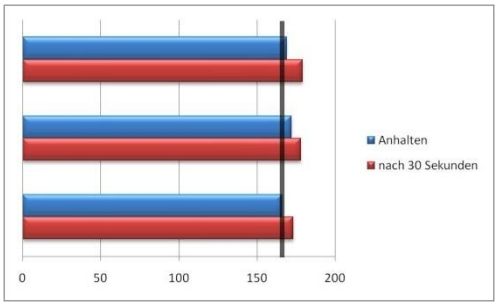


Abbildung 70: Teststrecke 9.0 – Angezeigte Strecken

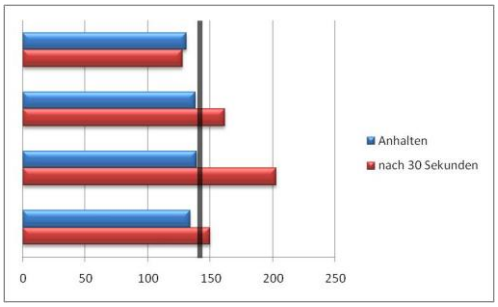


Abbildung 71: Teststrecke 9.1 – Angezeigte Strecken

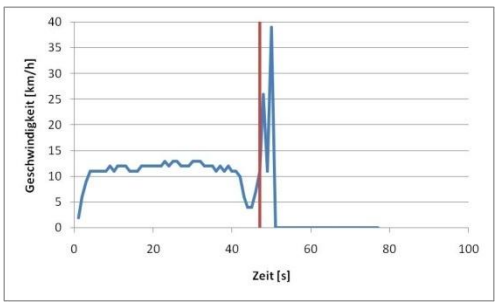


Abbildung 72: Teststrecke 9.1 – Geschwindigkeitsverlauf (Signalabbruch)

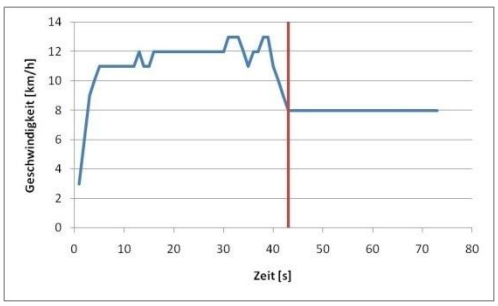


Abbildung 73: Teststrecke 9.1 – Geschwindigkeitsverlauf (Signalabbruch)

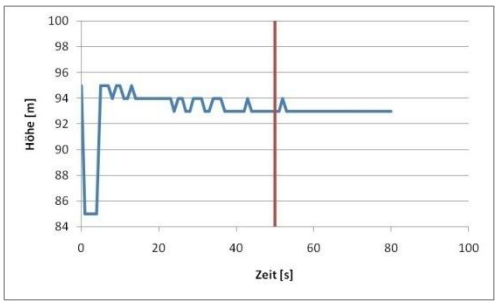


Abbildung 74: Teststrecke 9.0 – Höhenverlauf (Signalabbruch)

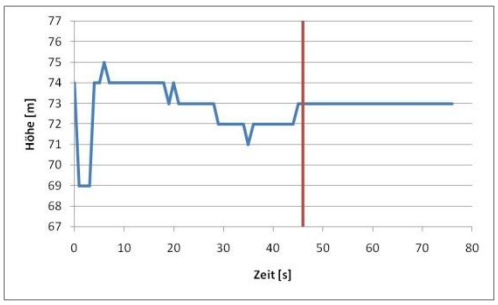


Abbildung 75: Teststrecke 9.1 – Höhenverlauf (Signalabbruch)

Teststrecke 10.0 (plötzliches Anhalten)

Mit Hilfe von Teststrecke 10.0 kann das Verhalten des Edge 305 bei plötzlichem Anhalten getestet werden. Es kommt zu keinerlei sonstiger Fehlereinflüsse wie z.B. Abschattungen. In Abbildung 76 wird ersichtlich, dass sich die Distanzen bis zum Haltepunkt und die endgültig angezeigten Strecken (nach 30 Sekunden) trotzdem unterscheiden.

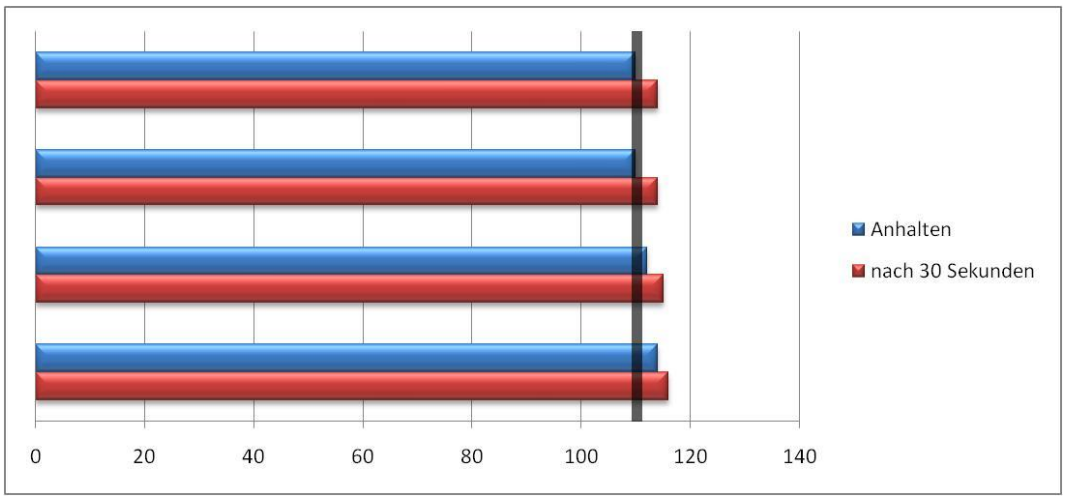


Abbildung 76: Teststrecke 10.0 – Angezeigte Strecken (Sollstrecke 110 m)

Nicht nur die zeitverzögerte Anzeige/Berechnung oder auch Filterung der Messwerte führt zu einer Zunahme der Distanzen über die Zeit, sondern auch ungenaue Positionsbestimmungen, die, wie in Abbildung 77 deutlich wird, eine fehlerbehaftete Strecke und dementsprechend auch Geschwindigkeit verursachen. Es handelt sich zwar nur noch um kleine Schwankungen << 1 m, die sich jedoch mit der Zeit aufsummieren.

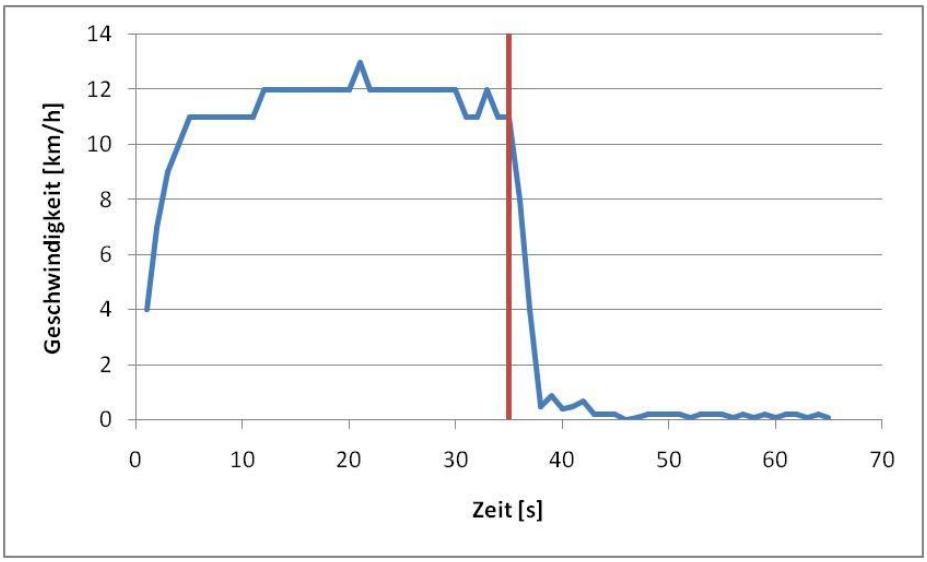


Abbildung 77: Teststrecke 10.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Die Höhe variiert nur noch um ± 1 m (siehe Abbildung 78), was sie allerdings fast sekündlich tut. Dies spricht bei dieser uneingeschränkten Sicht wieder stärker für eine Höhenmessung allein durch Nutzung des GPS. Zu diesen Schwankungen kann es jedoch auch kommen, wenn beispielsweise 68,5 m gemessen werden, wodurch Rundungseffekte hervorgerufen werden können.

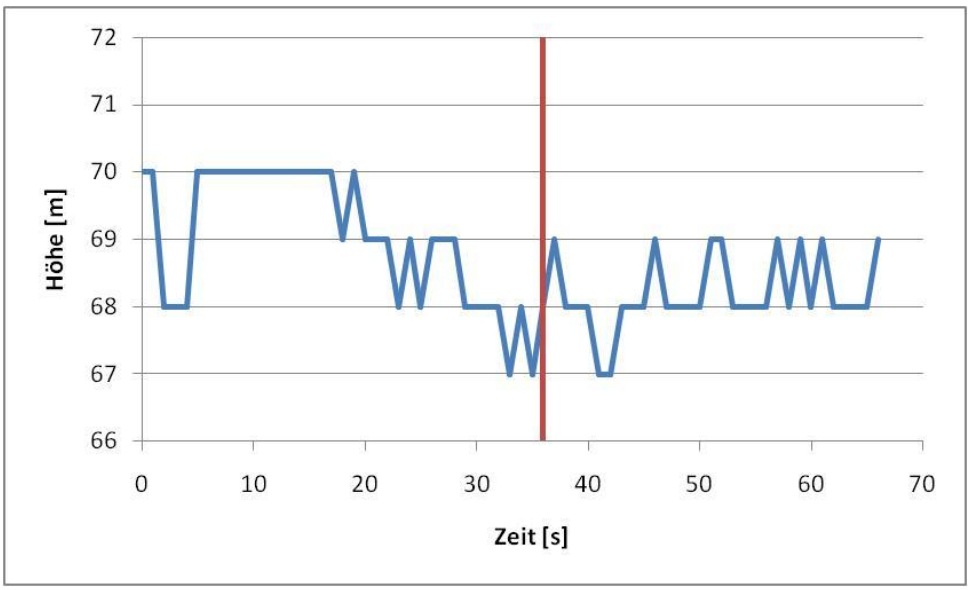


Abbildung 78: Teststrecke 10.0 – Höhenverlauf

Testpfeiler MD (Positionsgenauigkeit)

Zur Untersuchung der absoluten Lage- und Höhengenauigkeit wurde der Edge auf dem Messdach des Geodätischen Instituts der Universität Hannover getestet. Die dort aufgestellten Pfeiler sind koordinatenmäßig exakt bekannt, was einen Soll-Ist-Vergleich ermöglicht. Die Dauer der Aufzeichnung betrug 60 Minuten.

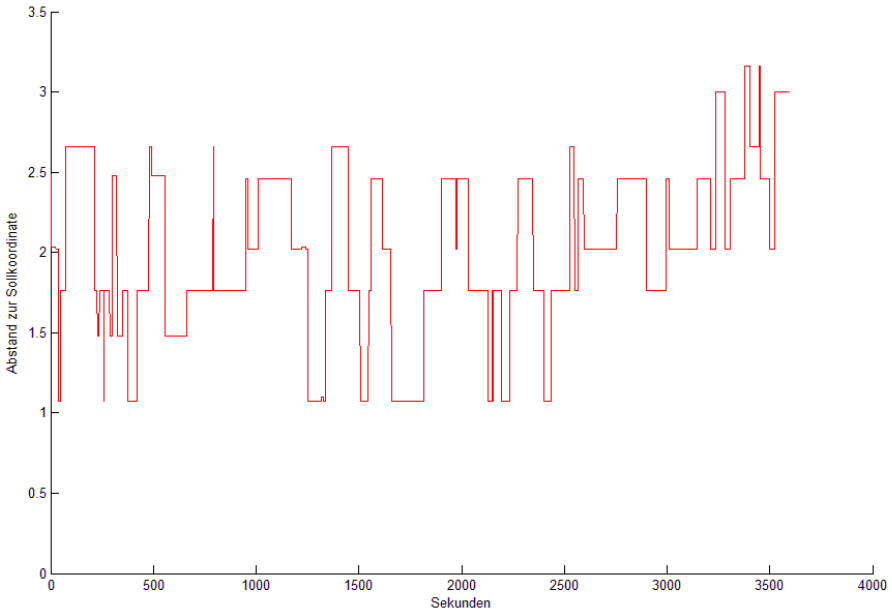


Abbildung 79: Messdach – Lagegenauigkeit

Abbildung 79 zeigt die jeweiligen Abstände zur Sollkoordinate über die Zeit. Es ergibt sich ein Mittelwert der Abweichungen vom Sollpunkt von 2,01 m, wobei sich die Werte in einem Bereich zwischen 1,08 m und 3,16 m bewegen. Die Standardabweichung beträgt 0,52 m. Einen Überblick über die Verteilung der bestimmten Positionen erhält man in Abbildung 80.

Laut Herstellerangaben soll eine Positionsgenauigkeit von < 10 m (RMS) erreicht werden, was hier auch der Fall ist. Aber auch die abgeschätzte und demzufolge zu erwartende Genauigkeit von < 5 m bei Messungen mit WAAS-/EGNOS-Korrekturdaten wird eingehalten.

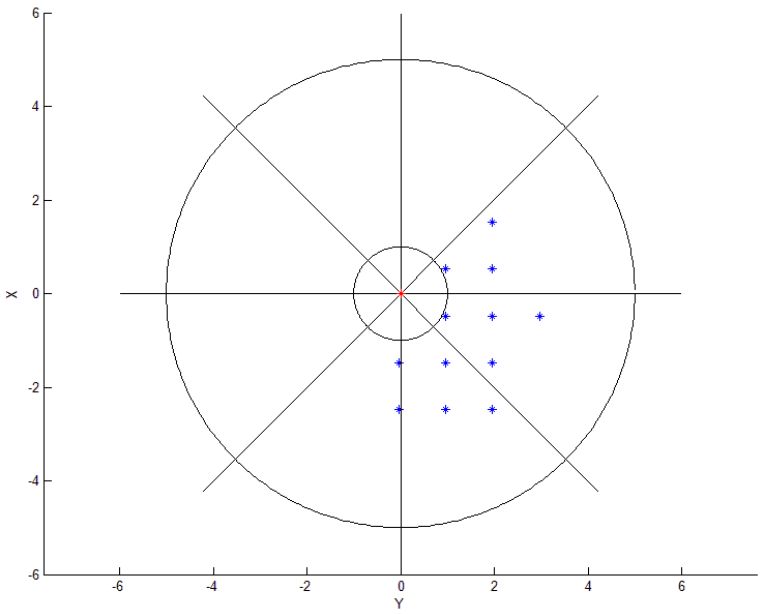


Abbildung 80: Messdach – Positionsgenauigkeit

Die Differenzen zur Sollhöhe sind in Abbildung 81 dargestellt. Zu Beginn der Beobachtungssession wird die Höhe noch 3…5 m zu niedrig gemessen, woraufhin sich die Abweichungen immer mehr verkleinern und nach ca. 40 Minuten schließlich die Sollhöhe erreicht haben. Auf diesem Niveau bewegen sich daraufhin alle aufgezeichneten Höhen.

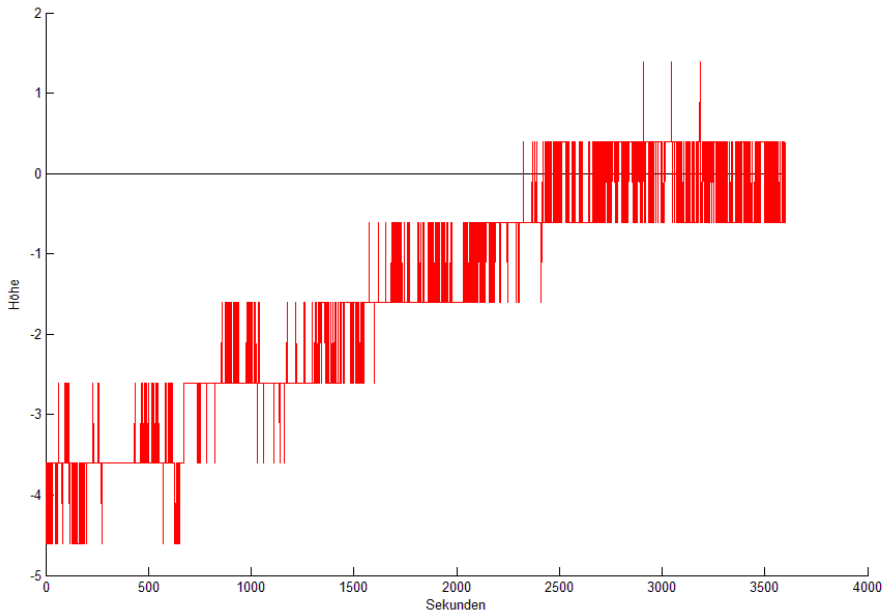


Abbildung 81: Messdach – Höhengenauigkeit

4.1.5 Messprinzip Fahrradcomputer

Der Edge 305 stellt in erster Linie einen Fahrradcomputer dar. Dem Handbuch zufolge werden Geschwindigkeit und Distanzen hauptsächlich durch die Verwendung von GPS bestimmt. Nur im Falle eines schwachen oder vollständigen Aussetzens des Satellitensignals werden diese Informationen über den Geschwindigkeitsfahrradsensor GSC 10 ermittelt. Das Messprinzip eines Fahrradsensors ist in Abschnitt 2.2 beschrieben. Im Folgenden wird gezeigt, dass es nur in wenigen Situationen zum Einsatz des GSC 10 kommt.

Teststrecke 1.0 (optimale Bedingungen)

Die Messergebnisse unter Referenzbedingungen auf Teststrecke 1.0 sind in Abbildung 82 dargestellt. Wie bereits bei den vorhergehenden Tests zur GPS-Funktion ergeben sich Genauigkeiten > 99 %.

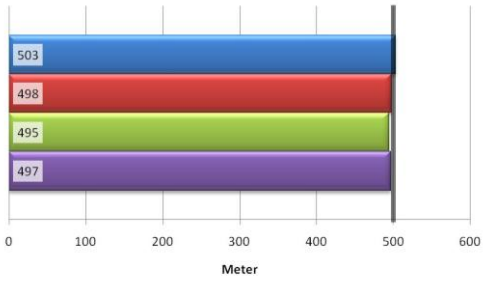


Abbildung 82: Teststrecke 1.0 - angezeigte Strecken

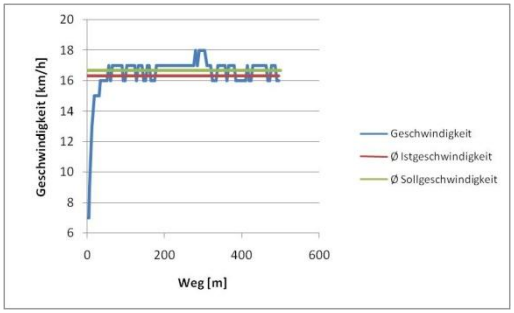


Abbildung 83: Teststrecke 1.0 - Geschwindigkeitsverlauf

Anhand des in Abbildung 83 gezeigten typischen Geschwindigkeitsverlaufes wird ersichtlich, dass die Bestimmung von Strecke und Geschwindigkeit ausschließlich auf GPS-Messungen beruhen. Aufgrund der höheren Fortbewegungsgeschwindigkeit durch das Fahrradfahren erscheint das Profil bei einem gleichbleibenden Speicherintervall etwas glatter im Vergleich zu den Lauf-Tests.
Ist- und Sollgeschwindigkeit liegen mit 0,36 km/h sehr dicht beieinander. Insgesamt schwankt die auf 1 km/h ausgegebene Geschwindigkeit im Bereich zwischen 16 und 17 km/h. Ungefähr auf der Hälfte der Strecke kommt es mit 18 km/h zu einer kurzfristigen Beschleunigung. Das Verhalten ist wahrscheinlich auf eine nicht zu 100 % konstante Geschwindigkeit während der Testdurchführung zurückzuführen.
Auch am Höhenverlauf (Abbildung 84) ist erkennbar, dass über die gesamte Strecke GPS-Signale zur Verfügung standen. Sprünge von z.T. 3 m sprechen gegen die Verwendung des barometrischen Höhenmessers, da dieser einen einheitlicheren Ablauf mit sich führen würde.

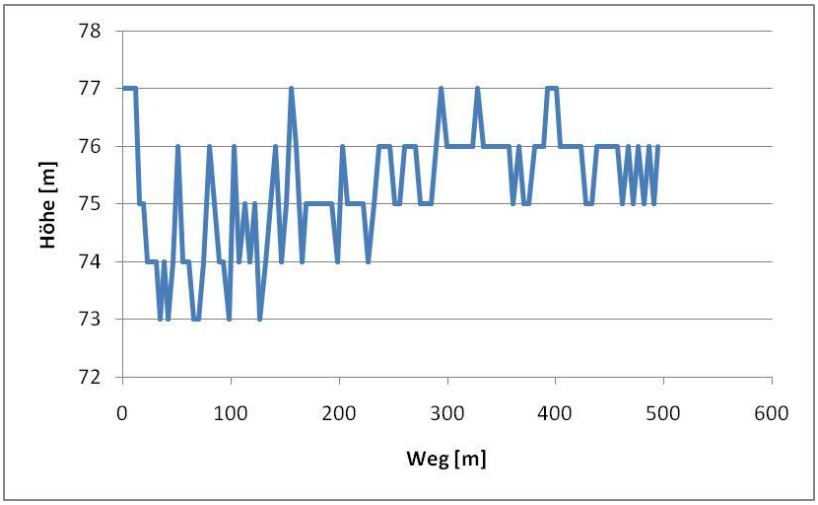


Abbildung 84: Teststrecke 1.0 - Höhenverlauf

Wie die Abbildungen verdeutlichen, kommt es hier nicht zum Einsatz des GSC 10. Bei einem ungestörten Satellitenempfang beruht die Geschwindigkeits- und Entfernungsmessung ausschließlich auf GPS-Signalen. Während der Tests lässt sich nur selten ein Zurückgreifen auf den Fahrradsensor nachweisen.

Teststrecke 2.1 (eingeschränkte Sicht durch Bäume)

Auf dieser 1000 m langen Teststrecke mit eingeschränkter Sicht im Georgengarten treten zwei unterschiedliche Geschwindigkeitsverläufe auf.

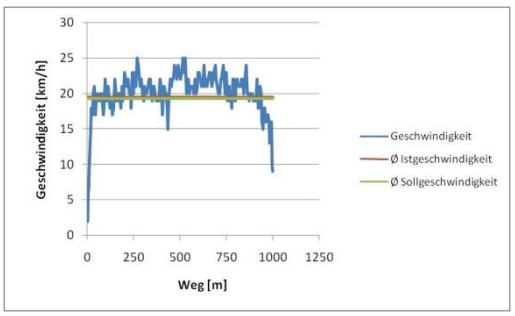


Abbildung 85: Teststrecke 2.1 - Geschwindigkeitsverlauf 1

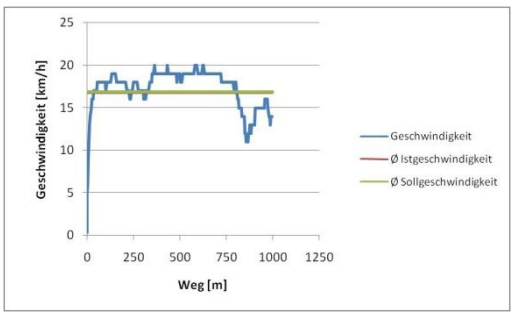


Abbildung 86: Teststrecke 2.1 - Geschwindigkeitsverlauf 2

Die erste Darstellung zeigt einen recht schwankenden Verlauf, der das typische Verhalten einer GPS-bestimmten Geschwindigkeit mit verschlechterten Signalen aufweist. Die Abweichungen liegen in einem Intervall von ca. 7 km/h.
Das zweite Profil hingegen ist stark geglättet. Es liegt ein eindeutiges Signal vor, welches nur sehr geringe Schwankungen aufweist und die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit näher beschreibt. Es wird ersichtlich, dass in diesem Fall der Fahrradsensor GSC 10 zur Unterstützung eingesetzt wurde, da das GPS-Signal durch die nahen Bäume stark abgeschattet wurde. Das Verhalten ist auch anhand der Tracks nachweisbar.

Abbildung 87: Teststrecke 2.1 - GPS-basierte Fahrt (pink) und Fahrt mit Zugriff auf GSC 10 (blau) (Überblick)

Abbildung 88: Teststrecke 2.1 - GPS-basierte Fahrt (pink) und Fahrt mit Zugriff auf GSC 10 (blau) (Ausschnitt)

Es zeigt sich, dass während der ersten Fahrt (pink) Signalstörungen durch Abschottungen aufgetreten sind. Folglich wird der Track als kurvig verlaufende Linie dargestellt, welche z.T. große Querabweichungen zur Sollstrecke aufweist. Bei der anderen Fahrt (blau) wurde die Geschwindigkeitsinformation mit den GSC 10 Fahrradsensor stabilisiert. Der

entsprechende Track verläuft als recht gerade Verbindung zwischen Start- und Endpunkt.

Die verschiedenen Methoden der Bestimmung führen auch Auswirkungen auf die Streckengenauigkeit mit sich, wie in Abbildung 89 zu sehen ist. Die beiden beschriebenen Fahrten sind hier als roter Balken (hauptsächlich GPS) und grüner Balken (GSC 10) dargestellt.

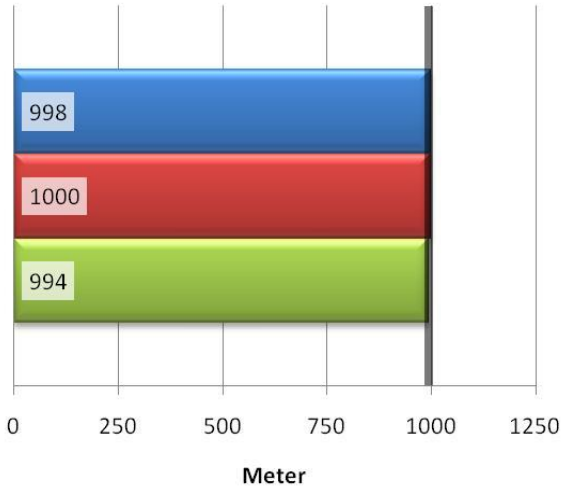


Abbildung 89: Teststrecke 2.1 - angezeigte Strecken

Die Streckenanzeige ist bei Verwendung des Fahrradsensors etwas kürzer. In den aufgezeichneten Daten ergibt sich eine Distanz von 995,5 m, wobei der Unterschied wieder auf die Anzeigeverzögerung zurückzuführen ist. Insgesamt ergibt sich bei der Streckenmessung eine genauere Angabe bei Einsatz von GPS. Steht kein Signal zur Verfügung, weicht der Edge auf den Fahrradsensor aus, der die Strecken anscheinend in diesem Fall etwas ungenauer erfasst. Die Genauigkeit beträgt trotzdem noch 99,4 %.

In Abbildung 90 ist der Höhenverlauf der Fahrt dargestellt, die mit Hilfe des GSC durchgeführt wurde. Das Verhalten weist sowohl stark wechselnde als auch einheitliche Bereiche auf. Daraus lässt sich schließen, dass die Höhen sowohl mit GPS (wo verfügbar) als auch mit einer barometrischen Höhenmessung ermittelt werden.

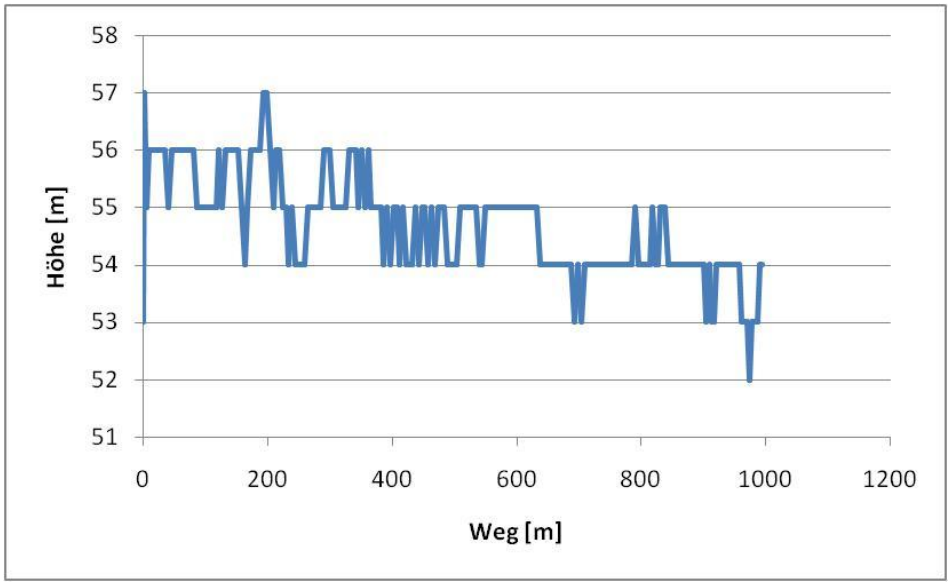


Abbildung 90: Teststrecke 2.1 - Höhenverlauf

Teststrecke 3 (stark eingeschränkte Sicht durch Wald)

Die Ergebnisse von Teststrecke 3.0 deuten darauf hin, dass trotz des dichten Waldes ausschließlich GPS-Informationen zu den Berechnungen verwendet wurden. Infolgedessen standen ausreichende Signale zur Verfügung und die Abschattung durch die Bäume hatte nur geringe Auswirkung. Der Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 91 weist ein typisches Verhalten des Edge bei einer Waldfahrt auf. Das häufige Schwanken spricht für einen GPS-Einsatz, wobei die Geschwindigkeiten in einem Bereich von maximal etwa 8 km/h alternieren. Ist- und Sollgeschwindigkeit unterscheiden sich in diesem Fall nur um 0,2 km/h. Dies spricht dafür, dass eine präzise GPS-Messung möglich war.

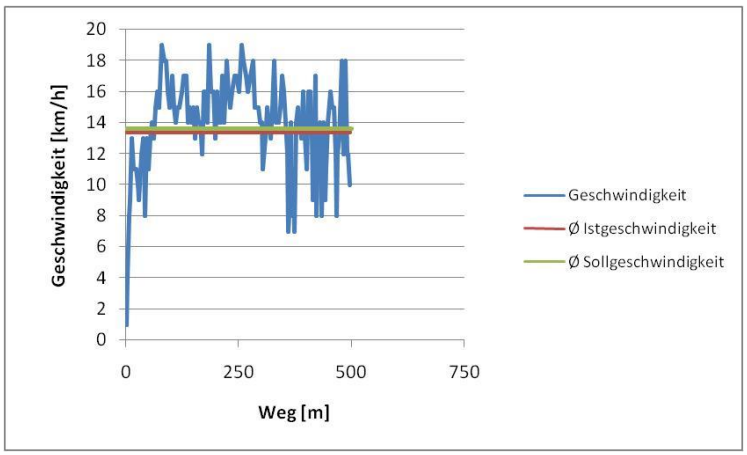


Abbildung 91: Teststrecke 3.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Die angezeigten Streckender 4 Testfahrten können Abbildung 92 entnommen werden. Die Genauigkeiten betragen >95 %. Es ergibt sich ein Mittelwert von 488 m mit einer Standardabweichung von 8 m.

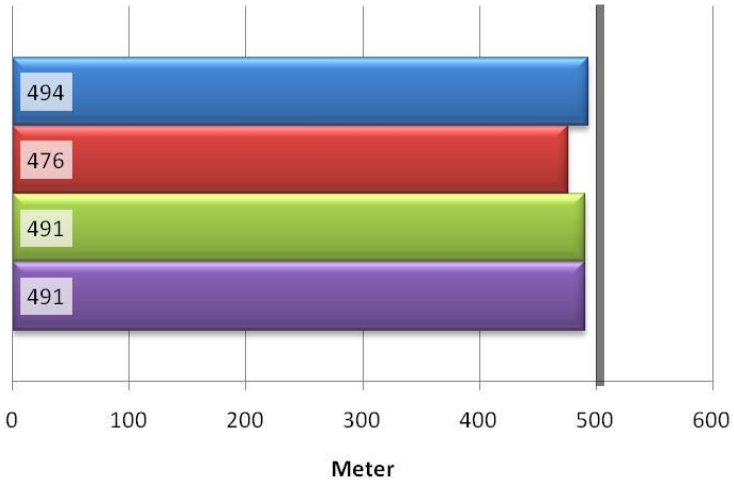


Abbildung 92: Teststrecke 3.0 - angezeigte Strecken

Teststrecke 8.0 (kurviger Streckenverlauf)

Auch die Auswertungen der Ergebnisse von der kurvigen Teststrecke 8.0 sprechen für einen weitgehenden Einsatz von GPS. Im Diagramm (Abbildung 93) ist entsprechend der langen Distanz ein etwas weniger schwankender Geschwindigkeitsverlauf dargestellt. Die deutlichen Minimalpunkte der Geschwindigkeit lassen sich auf die Kurven der Strecke zurückführen. Offensichtlich waren über die gesamte Distanz ausreiche GPS-Signale empfangbar. Sollte es zu einem kurzzeitigen GCS 10-Zugriff gekommen sein, so ist dies der Abbildung nicht zu entnehmen.

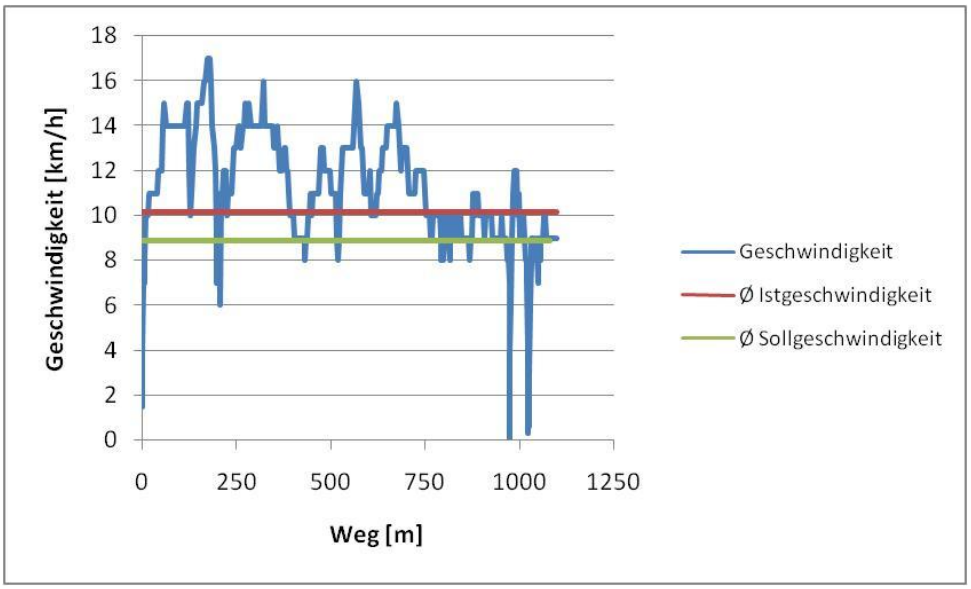


Abbildung 93: Teststrecke 8.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Während auf dem Display des Edge Distanzen zwischen 1060 und 1080 m abzulesen waren, sind in den Aufzeichnungen konstant 1100 m vermerkt (Abbildung 94). Folglich macht sich hier die Anzeigeverzögerung erneut bemerkbar. Die Genauigkeiten betragen >98 %

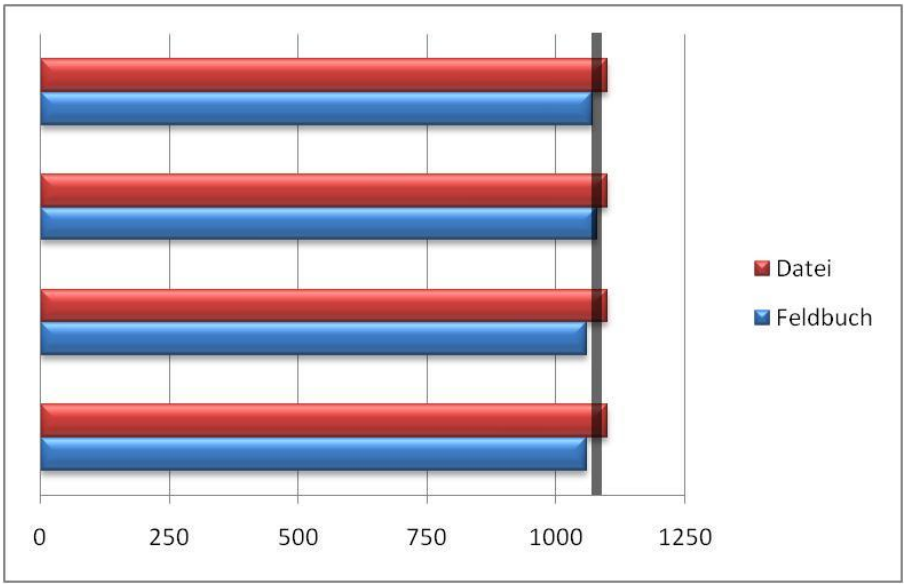


Abbildung 94: Teststrecke 8.0 - angezeigte und gespeicherte Strecken

Teststrecke 9.0 (Signalunterbrechung)

Auf Teststrecke 9.0 wurde das Verhalten bei einer kurzzeitigen GPS-Signalunterbrechung überprüft, indem die Strecke unter einer etwa 15 m langen Brücke entlang führte. Die Ergebnisse zeigen, dass auch hierbei der Fahrradsensor nicht (nachweisbar) eingesetzt wurde.

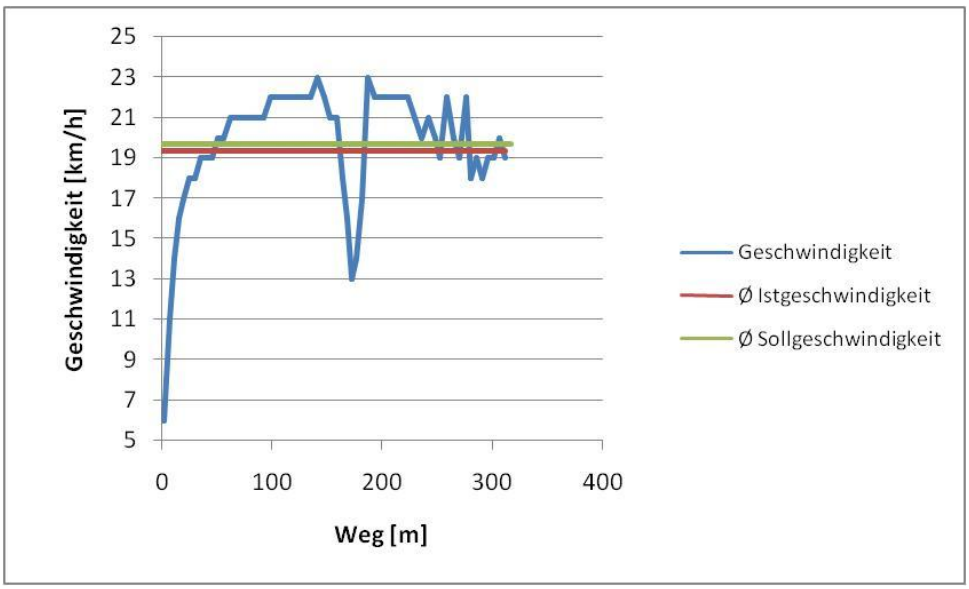


Abbildung 95: Teststrecke 9.0 – Geschwindigkeitsverlauf

In Abbildung 95 ist zu sehen, dass die Geschwindigkeit während der Fahrt unter der Brücke bei etwa 166 m angeblich abfällt. Dies ist ein eindeutiges Zeichen dafür, dass die Messung auf GPS-Informationen beruht und es an der besagten Stelle zu einem 10 km/h großen Geschwindigkeitsabfall kommt. Bei der Testfahrt wurde auf eine konstante Geschwindigkeit geachtet, daher ist das Verhalten nicht auf die Versuchsdurchführung zurückzuführen. Selbst bei einem schlechten GPS-Empfang wird nicht auf den GSC 10 zugegriffen, da sich ansonsten ein einheitliches Geschwindigkeitsniveau ergeben hätte.

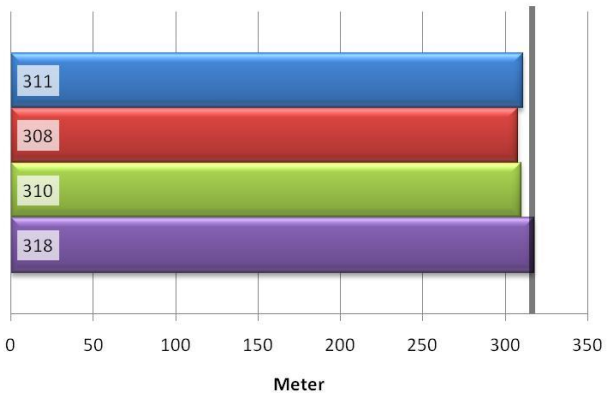


Abbildung 96: Teststrecke 9.0 - angezeigte Strecken

Die angezeigten Strecken zwischen 308 und 318 m ergeben einen Mittelwert von 311,75 m mit einer Standardabweichung von 2,2 m (Sollstrecke 117 m). Die Genauigkeit beläuft sich auf > 97 %.

Teststrecke 10.0 (Signalabbruch)

Abschließend wird der eben beschriebene Test unter einer deutlich längeren Brücke wiederholt. Anstelle der 15 m muss nun eine Distanz von 35 m ohne GPS-Signal überwunden werden.

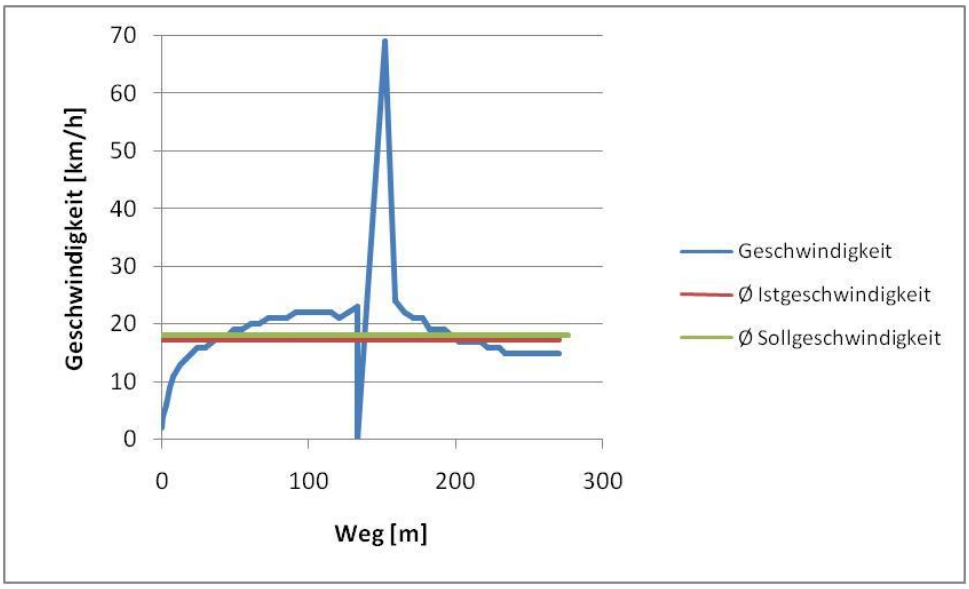


Abbildung 97: Teststrecke 10.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Das bereits bei Teststrecke 9.0 aufgetretene Verhalten wird bei diesem Test bestätigt. Wie in Abbildung 97 leicht ersichtlich, beruht die Geschwindigkeit auf GPS-Messungen. Das Aussetzen des Signals führt zu einem Abfallen auf 0 km/h. In dem Moment, an dem das der GPS-Kontakt wieder Hergestellt wird, muss die in der Zwischenzeit gefahrene Strecke kompensiert werden. Dies macht sich mit einem deutlich zu hohen Geschwindigkeitswert von 70 km/h bemerkbar, der jedoch schnell wieder korrigiert wird. Folglich kann auch in diesem Test der Zugriff auf den GSC nicht nachgewiesen werden.
Wie Abbildung 98 entnommen werden kann, ergibt sich trotz der kurzzeitigen Abschattungen auf der 276,6 m langen Teststrecke eine Genauigkeit von > 98 %.

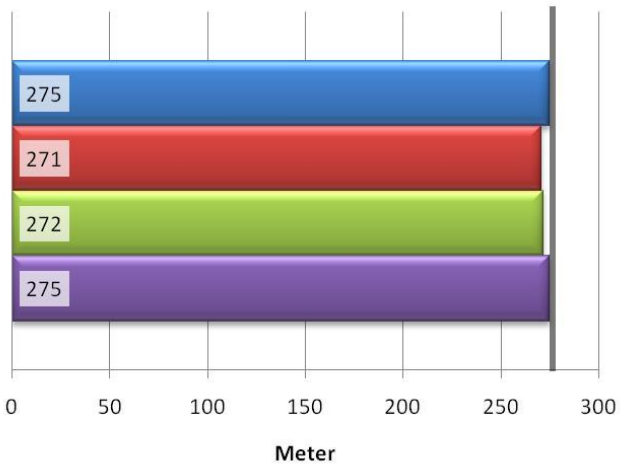


Abbildung 98: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken

4.1.6 Messprinzip barometrische Höhenmessung

Zur Untersuchung der Genauigkeit des eingesetzten barometrischen Höhenmessers wurden Tests im Außenbereich (Teststrecke 4.0 und 4.1) sowie innerhalb eines Gebäudes durchgeführt.

In Abbildung 99 werden die relativen Höhen reduziert auf die Anfangshöhe dargestellt. Die Überquerung des künstlich angelegten Hügels (siehe Teststrecke 4.0) verläuft recht gleichmäßig, weshalb hier zunächst einmal nur an signifikanten Stellen sowohl zur Einmessung der Strecke als auch bei den Tests Höhen gemessen bzw. abgelesen wurden. Es kommt dabei meist nur zu kleineren Abweichungen von jeweils 1…2 m, ausgenommen Lauf 2. Dabei ist die Ursache der offensichtlichen Verschiebung eine falsch bestimmte Anfangshöhe und ein dadurch verfälschter erster Höhenunterschied.

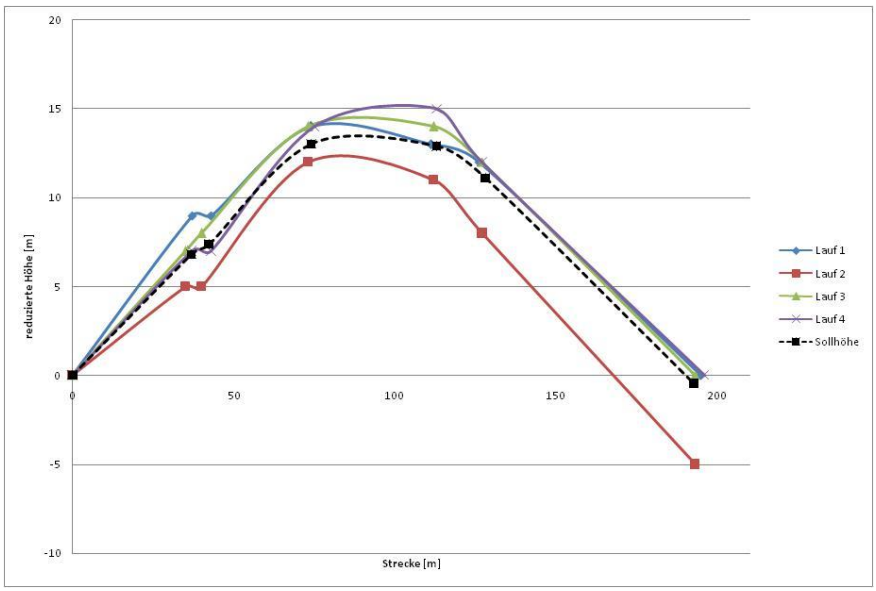


Abbildung 99: Teststrecke 4.0 – Relative Höhen

Während Abbildung 100 einen einzelnen typischen Höhenverlauf aus den aufgezeichneten Werten (Lauf 4) aufzeigt, werden in Abbildung 101 alle 4 Läufe in einem Diagramm, kombiniert mit der relativen Sollhöhe, dargestellt.

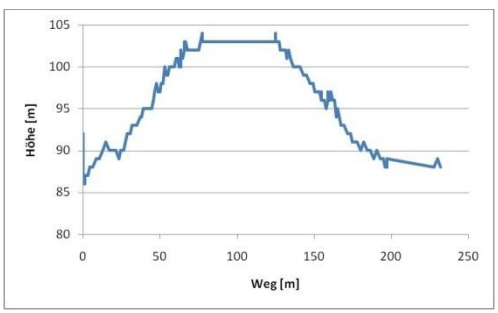


Abbildung 100: Teststrecke 4.0 – Einzelner Höhenverlauf

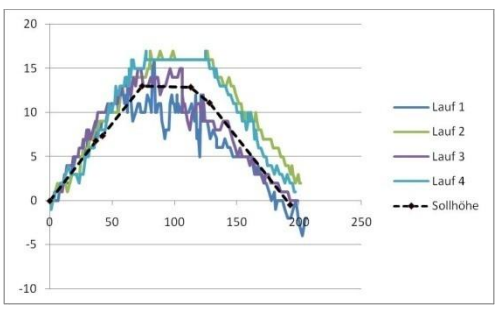


Abbildung 101: Teststrecke 4.0 – Vergleich aller Läufe mit relativer Sollhöhe

Teststrecke 4.1 bietet eine gleichmäßige Steigung bzw. ein gleichmäßiges Gefälle über eine längere Strecke von 259 m (siehe Teststrecken). Hier fanden weitere Genauigkeitsuntersuchungen statt. Dabei wurden zwei Höhen genau gemessen, wodurch ein Höhenunterschied von 12,41 m zustande kommt. An diesen zwei Stellen fanden daraufhin auch die Ablesungen statt. Reduziert auf die Anfangshöhe ergeben sich in Abbildung 102 Abweichungen zur Sollhöhe, auf der Krone des Gipfels, zu maximal 2,50 m (Lauf 3).

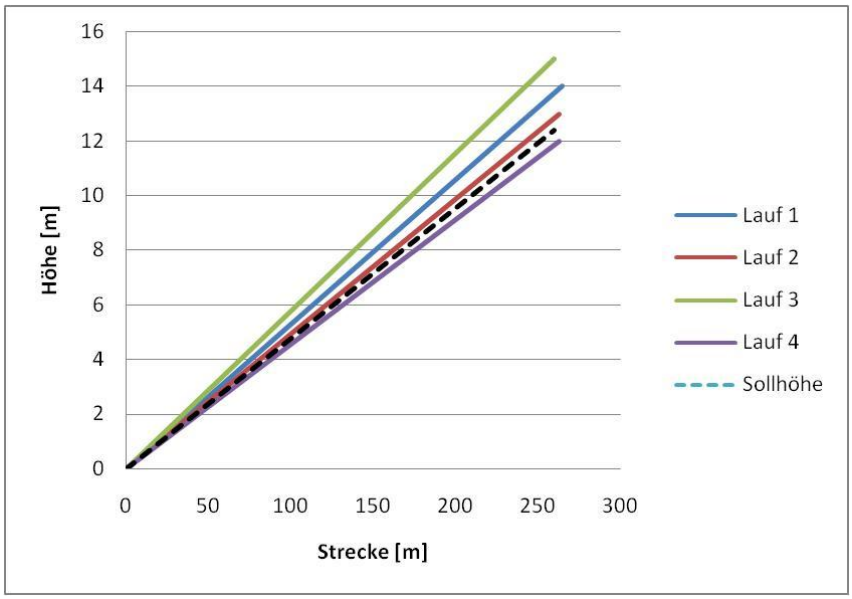


Abbildung 102: Teststrecke 4.1 – Relative Höhen

Abbildung 103 zeigt erneut einen einzelnen Höhenverlauf (Lauf 1), der jedoch durch starke Schwankungen (bis zu 4 m) vor allem im letzten Drittel der Strecke gekennzeichnet ist. Durch die aufgezeichneten Höhenverläufe in Abbildung 104 wird ersichtlich, dass im Endeffekt bei jeweils zwei Läufen Ähnlichkeiten auftreten, was damit zusammenhängt, dass es sich bei Lauf 1 und 3 um Abstiege, bei Lauf 2 und 4 um Aufsteige handelt. Fragwürdig ist allerdings, wodurch diese Unsicherheiten bei den Abstiegen hervorgerufen werden.

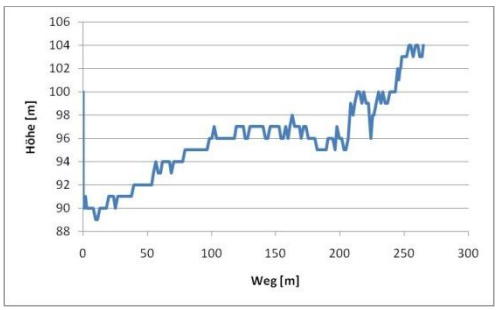


Abbildung 103: Teststrecke 4.1 – Einzelner Höhenverlauf

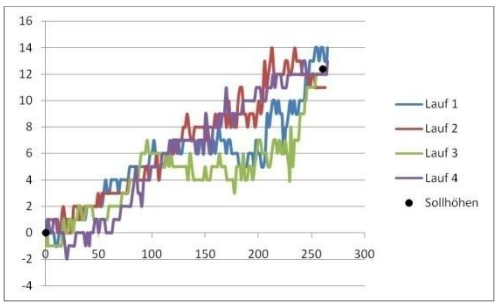


Abbildung 104: Teststrecke 4.1 – Vergleich aller Läufe mit relativer Sollhöhe

Um das Verhalten des Höhenmessers letztendlich noch unter möglichst geringem Einwirken von meteorologischen Einflüssen zu testen, wurde die Teststrecke MZ genutzt, bei der außerdem ein Zusammenspiel mit GPS ausgeschlossen werden konnte. Die Strecke befindet sich in vertikaler Anordnung im Treppenhaus des „MZ-Gebäudes“ der Universität Hannover. Beim Edge 305 muss keine Eichung durchgeführt werden, da dies durch absolute Höhenbestimmung per GPS geschieht. Können während der Messung keine Signale empfangen werden, wird die zuletzt gemessene Höhe verwendet. Um nun aber möglichst exakte Aussagen über die Genauigkeit treffen zu können, wurde die Anfangshöhe auf die Sollhöhe reduziert. In Abbildung 105 werden die gemessenen Höhen dargestellt. Die Abweichungen liegen bei durchschnittlich 1,29 m und die Standardabweichung beträgt 1,16 m. Während zu Beginn der Messung noch keine Differenzen zum Sollwert auftreten, sind es nach einem Höhenunterschied von 70 m bereits 1 bis 3 m. Daraus resultiert eine Genauigkeit von > 97,5 %.

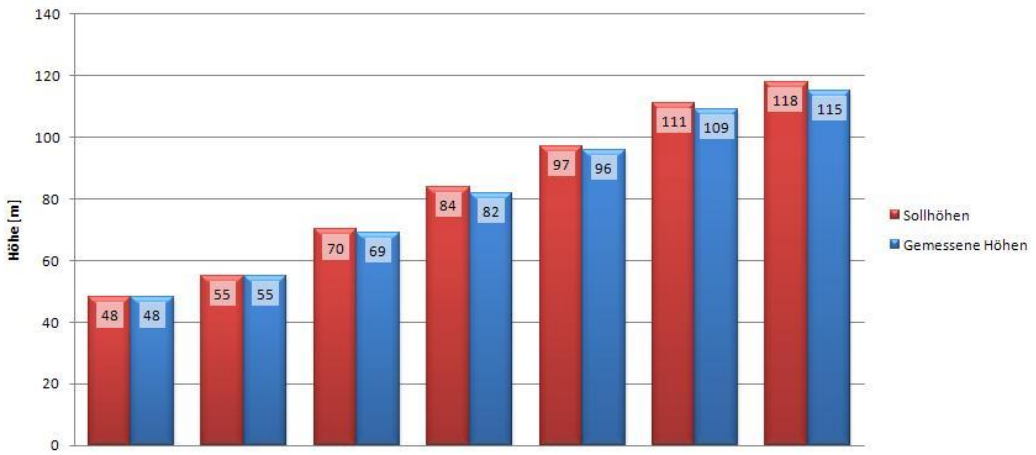


Abbildung 105: Teststrecke MZ – absolute Höhen

4.1.7 Zusammenfassung

Der Garmin Edge 305 ist ein ausgereifter Fahrradcomputer. Die Bedienung ist leicht verständlich und rein intuitiv möglich, trotzdem wird eine Vielzahl an Funktionen angeboten. Das Display ist übersichtlich und auch die Menüs sind gut eingeteilt. Einzig und allein das Kartenmenü wird bei längeren Distanzen etwas unübersichtlich, da es keinerlei Möglichkeiten gibt, den angezeigten Track zu verschieben. Man kann hier nur den Anzeigemaßstab ändern. Denkbar wäre auch eine direkte Koordinatenausgabe, die das Gerät, im Gegensatz zu älteren Produkten, nicht bietet. Der Stromverbrauch ist gering und auch die Ladezeiten sind sehr kurz. Nützlich ist dabei auch das gleichzeitige Laden des Geräts bei Verbindung über das mitgelieferte USB-Kabel mit einem PC/Notebook. Der Speicher könnte hingegen etwas größer sein, wenn man mehrere genau aufgezeichnete Tracks erhalten will und die Daten nicht täglich auslesen kann. Die angegebene Aufnahmezeit von 3,5 Stunden kann aber auch so bei einem einzigen Training bereits überschritten werden.

Die aufgezeichneten Strecken treffen häufig den wahren Streckenverlauf und auch die Streckengenauigkeit liegt meist bei > 99 %. Während Abschattungen durch Bäume weniger Probleme mit sich bringen, kommt es bei eingeschränkten Sichten durch Gebäude zu größeren Unsicherheiten. Besonders wichtig für die Genauigkeit ist dabei der Empfang von EGNOS-Korrekturdaten und der Konstellation der Satelliten. Häufig kann die Distanz von Läufen in Nord-Süd-Richtung dadurch genauer bestimmt werden als in Süd-Nord-Richtung. Dabei ist darauf zu achten, dass der Nutzer selbst für größere Abschattungen sorgt. Komplette Signalabbrüche oder längere Unterbrechungen wirken sich unterschiedlich aus. Auffällig war auch die Verzögerung der Anzeige der einzelnen Werte. In fast allen Fällen gestaltete sich die tatsächlich aufgezeichnete Distanz länger als die zu diesem Zeitpunkt angezeigte Strecke, wobei die Differenzen abhängig von den äußeren Bedingungen sind. Anscheinend rufen schlechtere Bedingungen längere Berechnungszeiten hervor, die dann dementsprechend zeitverzögert an die Ausgabeschnittstelle weitergeleitet werden. Betrachtet man das Kurvenverhalten des Edge 305, so fallen kaum Unsicherheiten ins Auge. Dabei kommt es weder zu „Drifts“ noch zu „Schnitten“, wodurch Richtungsänderungen einen eher kleinen Einfluss auf die Genauigkeit haben. Bei der Höhenmessung fällt bei eingeschränkten Sichten anfangs meist ein nicht unerheblicher Sprung auf, der darauf hindeutet, dass die absolute Höhe zu Beginn der Messung mittels GPS bestimmt wird. Anschließend übernimmt der barometrische Höhenmesser weitere relative Messungen. Bei optimalen Bedingungen mit größeren Signalstärken hingegen scheint der Edge seine Höheninformationen nur aus GPS-Messungen zu beziehen.

In Bezug auf den Fahrradcomputer lässt sich zusammenfassend feststellen, dass der GSC 10-Sensor nur selten Informationen zu Geschwindigkeiten und Distanzen beiträgt. Die Berechnungen des Gesamtsystems beruhen weitestgehend auf GPS-Messungen, und nur in Situationen eines unzureichenden oder fehlenden Signalempfangs wird auf den montierten Sensor zugegriffen.

4.2 FRWD W600

Hersteller:	FRWD
Bezeichnung/Modell:	W600
Eingesetzte(s) Messverfahren:	GPS, Barometrische Höhenmessung
Funktionen:	Anzeige: Distanz, Uhrzeit, Stoppuhr, Geschwindigkeit, Höhe, Herzfrequenz, Steuerkurs, spezielle Trainingseffektwerte Aufzeichnung (zusätzlich): Temperatur, Luftdruck, Neigung
Maße (BxHxT):	Uhr: 47 x 64 x 17 mm Empfänger: 55 x 95 x 15 mm
Gewicht:	Uhr: 46 g Empfänger: 84 g
Lieferumfang:	W600 Empfänger, Wrist Display (Uhr), Armbefestigung, 4 x Akkus, Akkuladegerät, USB-Übertragungsdongle, Pulsmesser, Software „FRWD Replayer Pro“
Akkulaufzeit:	bis zu 12 Std.
Preis:	ca. 399.- €

4.2.1 Gerätebeschreibung

Der FRWD W600 ist ein GPS-Empfänger mit zugehöriger Armbanduhr (Wrist Display). Zum Aufzeichnen der Tracks und zur Berechnung und Anzeige der Distanzen und Geschwindigkeiten wird zum einen das GPS-System genutzt, zum anderen werden 3D-Strecken und Geschwindigkeiten durch einen barometrischen Höhenmesser bestimmt. Die mitgelieferte Uhr dient dabei nur als Anzeigeschnittstelle, sämtliche Messungen gehen von dem Empfänger aus. Die Stromversorgung dieses Hauptgeräts wird durch drei AAA-Akkus sichergestellt, die laut Hersteller für bis zu 12 Stunden „Outdoor-

Betrieb“ und für bis zu 24 Stunden Aufzeichnung der Herzfrequenz („Indoor-Betrieb“) ausgelegt sind. Stattdessen können auch normale AAA-Batterien verwendet werden, wobei hier die Laufzeit von deren Leistung abhängt. Zum Laden der Akkus wird das mitgelieferte Ladegerät genutzt. Die Armbanduhr (46 g) wird über eine Knopfbatterie versorgt, die für etwa 500 Stunden Betrieb geeignet sein soll. Als Betrieb zählt hierbei die Zeit, in der die Uhr über Funk mit dem Empfänger verbunden ist um die Messwerte in Echtzeit anzuzeigen. Sie besitzt ein Monochrom-Display (ca. 25 x 22 mm), das aus 5 Zeilen besteht. Hier werden neben Standardsymbolen für Batteriezustand, Datenverbindung zum Recorder, ungefähre Anzahl der sichtbaren Satelliten und Pulsmesserempfang immer jeweils zwei Messgrößen mit ihren zugehörigen Bezeichnungen angezeigt. Die Uhr bietet zwei Tasten zur Steuerung, wobei eine Taste die LCD-Hintergrundbeleuchtung für einige Sekunden aktiviert und die andere bei Erstbetätigung einen Verbindungsversuch mit dem Empfänger unternimmt. Empfängt die Uhr Daten vom Recorder, so können über diese Taste die statisch angeordneten 4 Menüs durchgeschaltet werden. Ist dies nicht der Fall, kann lediglich die Uhrzeit abgelesen werden. Der Empfänger selbst besitzt eine Taste sowie 3 LED-Leuchten und die Möglichkeit akustische Signale auszusenden. Über diesen einen Bedienknopf wird die Aufzeichnung gesteuert, wobei der erste Tastendruck das Gerät einschaltet, der zweite startet die Aufnahme und ein dritter setzt entweder eine Wegmarke (kurz) oder stoppt die Speicherung von Messdaten und schaltet den Recorder aus. Eine Initialisierung und damit Herstellung einer ersten Positionierung (noch ohne Speicherung) findet durchschnittlich nach 49 Sekunden statt. Durch Speicherung der letzten Position, verringert sich die Zeit, wenn das Gerät in der Nähe der vorangegangenen Nutzung eingeschaltet wird. Die finnische Herstellerfirma FRWD (sprich „Forward“) gibt als Maß für die Initialisierungszeiten < 60 Sekunden an. Dies betrifft jedoch nicht das erstmalige Initialisieren überhaupt oder das Positionieren nach Veränderung des Standorts um mehrere hundert Kilometer. Die Einstellungen des Empfängers („Outdoor- und Indoor“-Betrieb, Ein- und Ausschalten der optischen und akustischen Signale sowie diverse Trainingseinstellungen, wie beispielsweise die maximale Herzfrequenz, Alter, usw.), können nur mit Hilfe der mitgelieferten Software per Funk verändert werden. Dazu dient der 2,4 GHz USB-Dongle. Als wichtigste Recorder-Option kann im Programm auch das Aufzeichnungsintervall (zwischen 1…6 Sekunden) eingestellt werden. Der interne 16 MB Flash-Speicher eignet sich so bei einem Intervall von 6 Sekunden für bis zu 60 Stunden Datenerfassung (10 Stunden bei 1 Sekunde). Außerdem können mit der Software „FRWD Replayer PRO“ Trainings bzw. Tracks und markierte Wegpunkte vom W600 zum PC/Laptop übertragen und im Programm analysiert werden.

Primäres Messverfahren des FRWD W600 ist die GPS-Postionierung bzw. Navigation. Es wird eine Kombination aus 12-Kanal-Empfänger und GPS-Antenne benutzt. Bei Angabe einer Positionsgenauigkeit < 3 m (90 % der Zeit) erscheint eine Verarbeitung von WAAS-/EGNOS-Korrekturdaten als sehr wahrscheinlich, wird aber nicht direkt angegeben. Für die Höhenkomponente ist zusätzlich ein barometrischer Höhenmesser im Recorder verbaut. Dieser übernimmt die Bestimmung von Höhenunterschieden bezogen auf die per GPS ermittelte Anfangshöhe, was bedeutet, dass lediglich zu Beginn der Messung

eine absolute Höhe durch Satellitenpositionierung stattfindet. Anschließend werden nur noch relative Höhen durch barometrische Höhenmessung ermittelt.

4.2.2 Bedienung

Beim FRWD W600 ist keine gedruckte Bedienungsanleitung im Lieferumfang enthalten, stattdessen befinden sich jeweils ein Handbuch für den Recorder und Pulsmesser (19 Seiten), eine Kurzanleitung der Armbanduhr (9 Seiten) und eine kurze Broschüre mit den technischen Daten in verschiedenen Sprachen (Deutsch, Englisch, Französisch, Spanisch, Schwedisch und Finnisch) auf der mitgelieferten CD. Jedes dieser Teilhandbücher ist sehr übersichtlich und ansprechend (mit vielen Bildern) gestaltet. Um den W600 nutzen zu können, empfiehlt es sich zuvor die kurze Anleitung durchzulesen, da eine rein intuitive Bedienung nicht möglich ist. Interessant sind dabei besonders die verschiedenen optischen und akustischen Signale sowie die Steuerung des Empfängers über die Bedientaste. Sobald man das System verstanden hat, ist die komplette Bedienung sehr leicht und durch die wenigen Einstellungsmöglichkeiten auch völlig unkompliziert. Doch gerade dadurch besteht natürlich auch nicht die Möglichkeit einer Anpassung der Anzeige. In Abbildung 106 sieht man beispielsweise nur die Stoppuhr (unten) und die zurückgelegte Strecke (oben). Drei der vier mitgelieferten AAA-Akkus versorgen den W600 über einen großen Zeitraum mit Strom. Das im Lieferumfang enthaltene Ladegerät besitzt keine Verlängerungsschnur und muss direkt in die Steckdose eingesteckt werden. Außerdem ist es nur möglich entweder 2 oder 4 Batterien gleichzeitig zu laden, benötigt werden aber 3. Sowohl die Kontakte des Ladegeräts als auch die Klappe des Batteriefachs des W600 wirken nicht einwandfrei verarbeitet. Während die Statusleuchten, die den Ladevorgang symbolisieren sollen, erst nach kleineren Verschiebungen und Verdrehungen der Akkus aktiv werden, steht der Deckel auf der Rückseite des Recorders zu allen Seiten hin etwas über, was bei der Bedienung natürlich keinen Nachteil darstellt.

Abbildung 106: Anzeige des „Wrist Displays“

Die Installation und Bedienung der mitgelieferten Software „FRWD Replayer PRO“ sind unkompliziert. Das Programm bietet die Möglichkeit, wie in Abbildung 107 zu sehen ist, den gesamten übertragenen Track im sogenannten „Replay“-Modus noch einmal mit verschiedenen Geschwindigkeiten abzuspielen. Dabei wird der Weg in einer Übersichtskarte (2D oder 3D) und direkt daneben der zugehörige Höhenverlauf

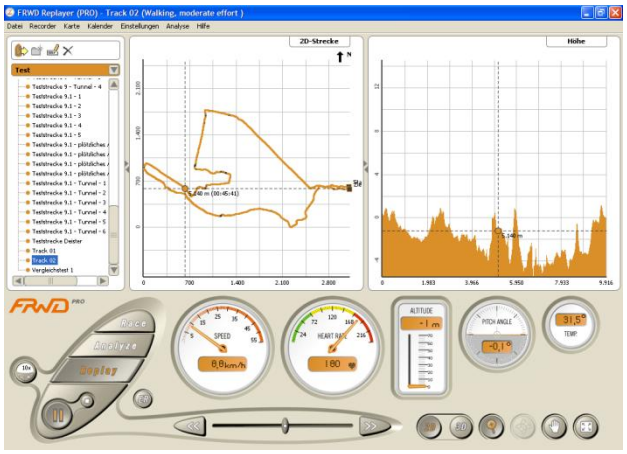


Abbildung 107: FRWD Replayer Pro

dargestellt. Beim Abspielen des Tracks wandert ein Cursor jeweils in beiden Bildern entlang des Verlaufs. Dabei werden zusätzliche Daten wie maximale Geschwindigkeit, minimale Höhe oder auch maximale Herzfrequenz durch kurzes Anhalten und eine blinkende Anzeige verdeutlicht. Im Analyse-Modus gibt es dann noch die Möglichkeit verschiedenste Durchschnitts- und spezielle Trainingswerte einzusehen. Außerdem können hier sämtliche Messdaten grafisch dargestellt werden. Der Anschluss des Geräts an einen PC/Laptop erfolgt mittels USB-Funk-Dongle. Mit wenigen Klicks werden anschließend die aufgezeichneten Strecken, Wegpunkte und sonstige Daten übertragen. Die Trainings können dann in Listenform sortiert und unter anderem auch ausgetauscht werden. Besonders praktisch ist die Ausgabe einer Google-Earth-Datei (.kml), wodurch es möglich wird, den zurückgelegten Weg in der Karte direkt zu betrachten, da sich im Softwareumfang kein zusätzliches Kartenmaterial befindet. Karten lassen sich jedoch als Bilder hinter den gewünschten Track legen. Mal abgesehen von den wenigen Einstellungsmöglichkeiten des Recorders, die auch darüber vorgenommen werden, enthält das Programm einige Optionen (Profile, Trainingseigenschaften, usw.). Zudem handelt es sich noch um eine vor allem grafisch sehr ansprechende Benutzeroberfläche kombiniert mit einer einfachen Bedienung.

4.2.3 Tragekomfort

Das Gesamtgewicht des kompletten Sets beträgt 245 g, wobei sich 143 g auf den Oberarm, 46 g auf das Handgelenk und 56 g auf die Brust verteilen. Die Uhr sitzt sehr gut am Handgelenk und fällt weder optisch noch vom Gewicht her auf. Der Pulsmesser (56 g) liegt mit seinem verstellbaren und elastischen Band gut an der Brust an (Umfang von ca. 66 – 94 cm). Die Oberarmhalterung mit dem Recorder ist auch für größere Umfänge geeignet (ca. 20 – 50 cm). Gewicht und Material lassen sich an der Stelle angenehm tragen. Etwas störend ist jedoch das bei angezogenem Band überstehende Endstück, was beim Laufen etwas herumfliegt. Bei einer Kombination aus sehr rutschigen Kleidermaterialien und Armhalterung muss letztere sehr fest angezogen werden, damit diese nicht ständig weiter nach unten rutscht. Dies kann jedoch bei längeren Trainings auch unangenehm werden, wenn die Halterung zu eng anliegt.

4.2.4 Messprinzip GPS

Teststrecke 1.0 (optimale Bedingungen)

Für die Untersuchung der Genauigkeit der Distanz- und Geschwindigkeitsmessung des FRWD W600 wurde dieser zunächst auf der Referenzstrecke (siehe Teststrecke 1.0) unter optimalen Bedingungen getestet. Dabei wurden folgende Distanzen gemessen:

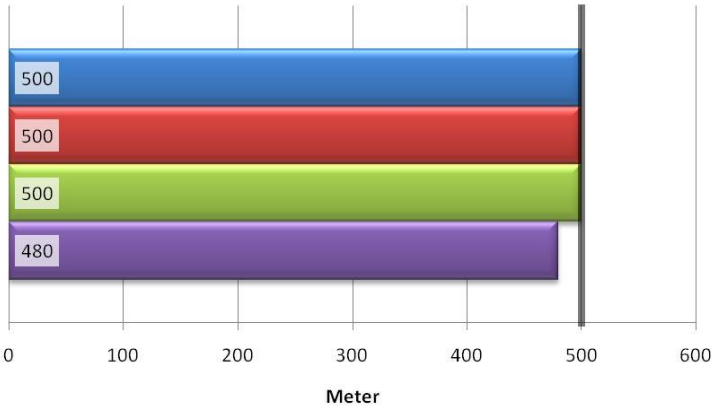


Abbildung 108: Teststrecke 1.0 - Angezeigte Strecken (Sollstrecke 500 m)

Aus den Werten in Abbildung 108 resultieren ein Mittelwert von 495 m und eine Standardabweichung von 8,66 m. Als streckenabhängige Genauigkeit kann dementsprechend ein Wert von mindestens 96 % erreicht werden. FRWD gibt eine Streckengenauigkeit von > 99 % bei guten Bedingungen an. Diese werden hier nur durch den letzten Wert nicht eingehalten. Der Grund für diese viel zu kurze Messung zeigt sich in Abbildung 109, wobei die Ursache dieses plötzlichen Abweichens von der Sollstrecke und das darauffolgende Ende der Aufzeichnung schwer auszumachen ist.

Abbildung 109: Teststrecke1.0 – Lauf 4

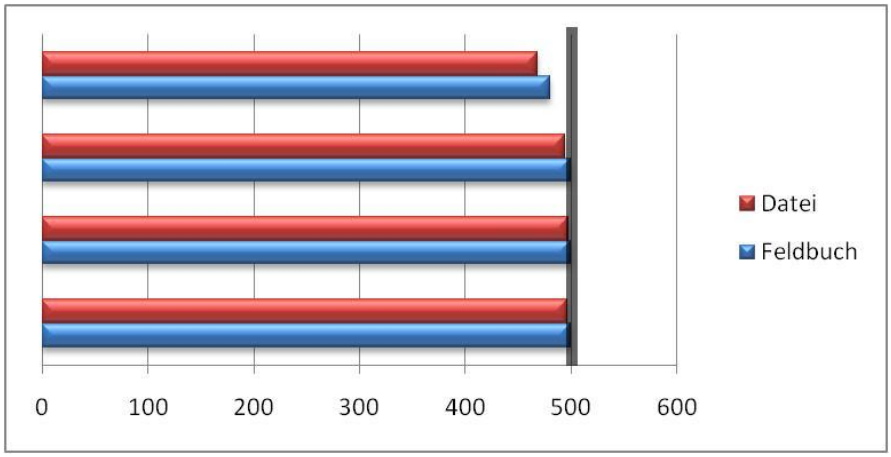


Abbildung 110: Teststrecke 1.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Da die mitgelieferte Armbanduhr des FRWD W600 nur Strecken auf volle 10 Meter genau anzeigt, ist es natürlich sinnvoll, die in Abbildung 110 dargestellten aufgezeichneten Distanzen zu betrachten, wobei die Reihenfolge der Läufe von unten nach oben abzulesen ist (4. Lauf = oben, 1. Lauf = unten). Während bei den ersten drei Durchläufen von maximal 494 m auf 500 m aufgerundet wurde (siehe Lauf 3), beträgt die bei dem „Ausreißer“ (siehe Lauf 4) laut aufgezeichneter Daten zurückgelegte Strecke 468 m, angezeigt wurden dann 480 m. Lässt man diese Beobachtung heraus, liegt die Streckengenauigkeit immerhin bei > 98,8 %. Insgesamt bleibt jedoch festzuhalten, dass bei der Anzeige der Werte nur auf- und nicht abgerundet wird.

Abbildung 111: Teststrecke 1.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Die aufgezeichneten Tracks haben jeweils nur sehr geringe Querabweichungen zu der genau eingemessenen Sollstrecke, wie hier in Abbildung 111 zu sehen ist.

Abbildung 112: Teststrecke 1.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (blau)

Die maximale Abweichung aller Läufe senkrecht zur Sollstrecke beträgt 7,17 m, wobei Werte in dieser Größenordnung eher selten sind. In Abbildung 112 ist dieses Maximum dargestellt. Es befindet sich gleich am Anfang der 500 m langen Referenzstrecke und entspricht der ersten aufgezeichneten Koordinate. Wie hier auch schon ansatzweise zu erkennen ist, nähert sich der Track (gelb) immer mehr der Sollstrecke (pink) an. Die gemessene Distanz liegt bei dieser Strecke allerdings trotz dieser anfänglich fehlerbehafteten absoluten Positionierung bei 496 m.

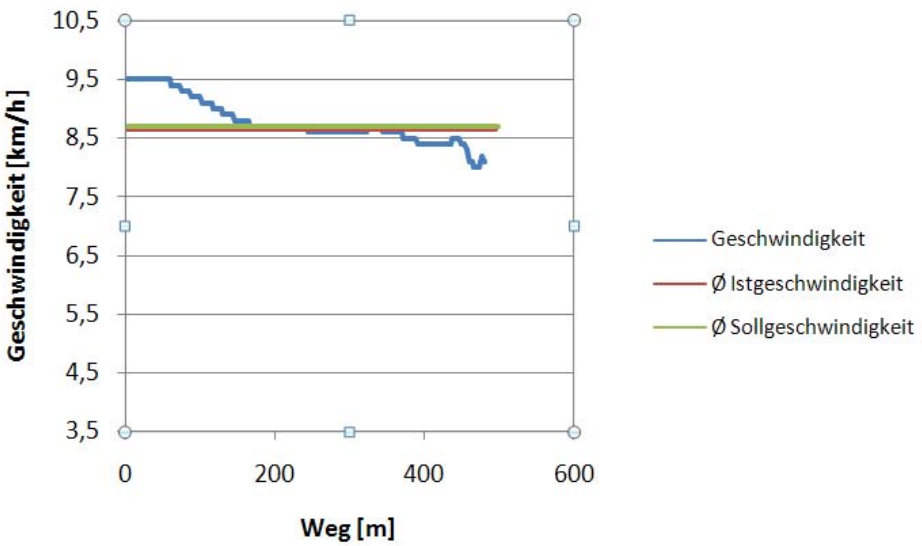


Abbildung 113: Teststrecke 1.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Bei der Durchführung der Tests wurde auf eine möglichst gleichmäßige Geschwindigkeit geachtet. In Abbildung 113 zeigt sich so ein typischer Geschwindigkeitsverlauf über die Strecke. Die Geschwindigkeit schwankt hier maximal bis zu 1 km/h. Betrachtet man die mittlere Sollgeschwindigkeit und die mittlere Ist-Geschwindigkeit, so erkennt man, dass diese fast identisch sind. Die Differenz beträgt nur 0,04 km/h, wobei sich die Sollgeschwindigkeit auf die Sollstrecke dividiert durch die tatsächlich verstrichene Zeit bezieht. Insgesamt kann man also eine sehr gleichmäßige Geschwindigkeit über die gesamte Strecke beobachten. Diese wird auf eine Nachkommastelle genau berechnet, was größere Schwankungen durch Rundungen gar nicht erst ermöglicht. Teilweise ändert sich der Wert in 30 Sekunden gar nicht, was auf eine Glättung der Messwerte deutet.

Dies spiegelt sich auch in den Höhenverläufen wie in Abbildung 114 wieder. Die Werte bewegen sich hier insgesamt nur in einem Bereich von 1,10 m. Der Höhenunterschied vom Start- bis zum Endpunkt beläuft sich auf Teststrecke 1.0 auf 1,17 m. Dem Graphen kann man eine Höhendifferenz zwischen Start und Ziel von 0,90 m entnehmen. Die Abweichung von 0,27 m kommt nur durch die leichte Schwankung am Ende des Verlaufs zustande. Etwas komisch ist auch, dass es auf den ersten 130 m zu keinerlei Höhenänderungen kommt. Insgesamt kann man aber für diesen Verlauf sagen, dass die vom Hersteller angegebene Genauigkeit von < 1 m bei relativen Höhen bei Weitem eingehalten wird.

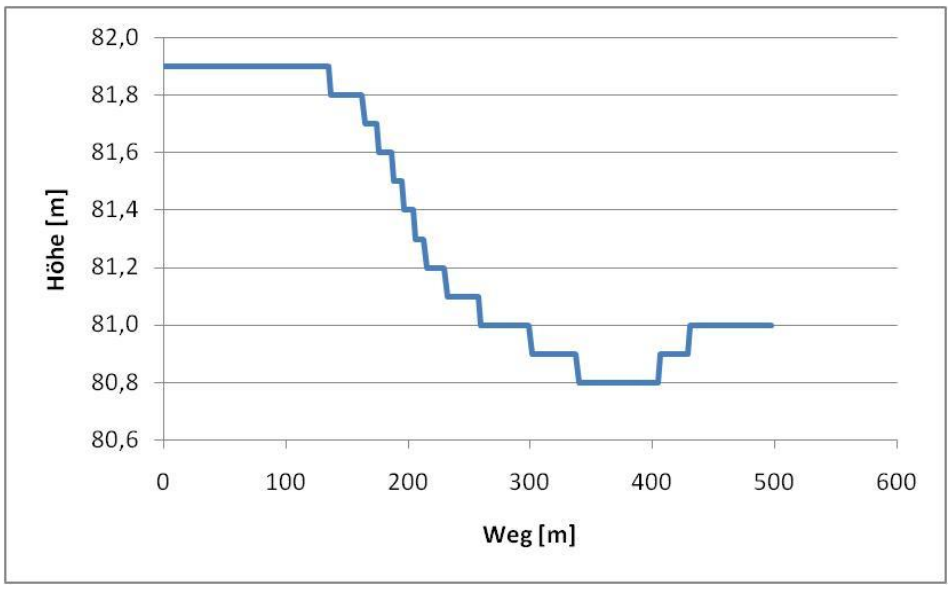


Abbildung 114: Teststrecke 1.0 – Höhenverlauf

Teststrecke 2.0 (eingeschränkte Sicht durch Gebäude)

Anschließend wurden die Geräte auf Teststrecke 2.0 unter eingeschränkter Sicht durch Gebäude und somit unter verschlechterten Bedingungen getestet. In Abbildung 115 sind die Ergebnisse der Läufe aufgelistet. Der Mittelwert beträgt 880 m und die Standardabweichung berechnet sich zu 21,21 m. Man erkennt hier schon, dass sämtliche Strecken, verglichen mit dem Sollwert (824 m), viel zu lang gemessen wurden. In diesem Fall wird nur noch eine Streckengenauigkeit von > 90,5 % erreicht. Angezeigte und aufgezeichnete Werte liegen noch weiter auseinander (siehe Abbildung 116). Dabei kommt es nicht mehr nur zu Aufrundungen auf die nächsten vollen 10 Meter, sondern schon zu beachtlichen Sprüngen. Betrachtet man beispielsweise das Wertepaar für Lauf 3, wird deutlich, dass hier bereits eine Differenz von 34 m entstanden ist, wobei die Ursache dafür schwer auszumachen ist: Es könnte sich um erhöhte Berechnungszeiten oder schlechte Prädiktionen handeln. Vorstellbar wären auch „Drifts“ in Kurven.

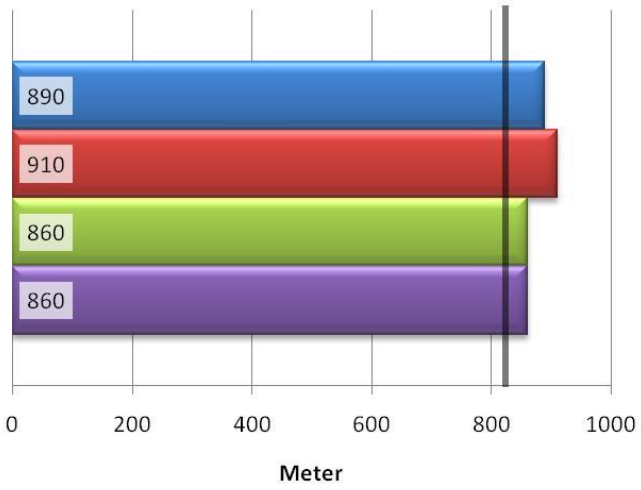


Abbildung 115: Teststrecke 2.0 – Angezeigte Strecken (Sollstrecke 824 m)

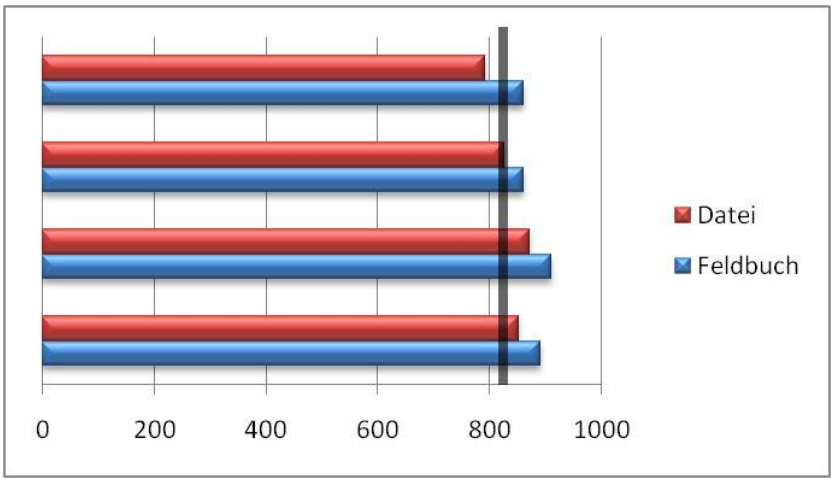


Abbildung 116: Teststrecke 2.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Bei einer Betrachtung der aufgezeichneten Tracks (siehe Abbildung 117) wird deutlich, dass eingeschränkte Sichten, wie erwartet, einen Einfluss auf die Genauigkeit haben. Der größte Teil des aufgezeichneten Tracks weist große Abweichungen zur Sollstrecke auf. Die maximale Querabweichung liegt bei 31,12 m, wobei es an vielen Stellen zu Werten in der Größenordnung bis zu 20 m kommt.

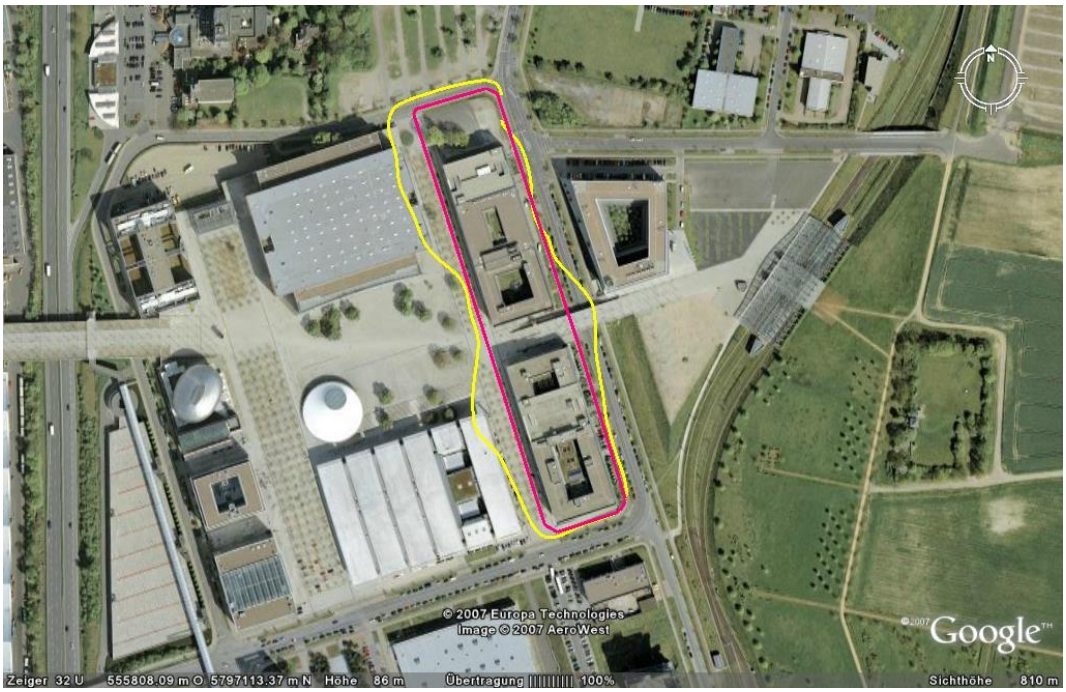

© 2007 Europa Technologies
Image © 2007 AeroWest
Google
Zeiger 32 U 555808.09 m O 5797113.37 m N Höhe 86 m Übertragung 100% Sichthöhe 810 m

Abbildung 117: Teststrecke 2.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Nur in wenigen Teilen der Strecke kommt es zu Überlappungen wie beispielsweise im südlichen Teil: Durch die höhere Anzahl von GPS-Satelliten in Richtung Süden und die verbessere Empfangsmöglichkeit von EGNOS-Korrekturdaten fallen aufgezeichneter Track und Sollstrecke fast zusammen, was in Abbildung 118 noch einmal vergrößert dargestellt ist. Zu ähnlichen Effekten kommt es auch in Abbildung 119: Auf der linken Seite der Gebäude wird der aufgezeichnete Weg durch die kurzzeitig verbesserten Empfangsbedingungen wieder an die Sollstrecke angenähert, während es durch den Fußgängerüberweg auf der rechten Seite zu großen Unsicherheiten und starken Abweichungen kommt. Hier zeigen sich Schwächen in der absoluten Positionierung. Obwohl sich der Startpunkt im äußersten Nordosten des Kurses noch relativ gut zur Initialisierung eignet, beginnen einige registrierte Tracks ihre Aufzeichnung direkt in Gebäuden, wie in Abbildung 120 zu sehen ist.

Abbildung 118: Teststrecke 2.0 – Kurve im südlichen Teil

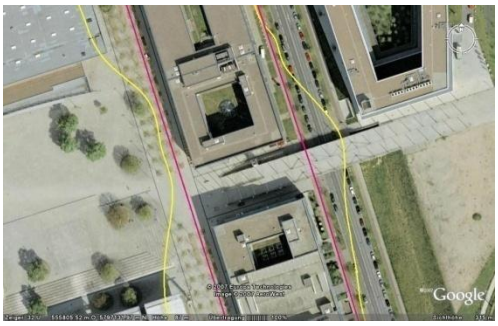


Abbildung 119: Teststrecke 2.0 – verschiedene Bedingungen

Abbildung 120: Teststrecke 2.0 - Startpunkte

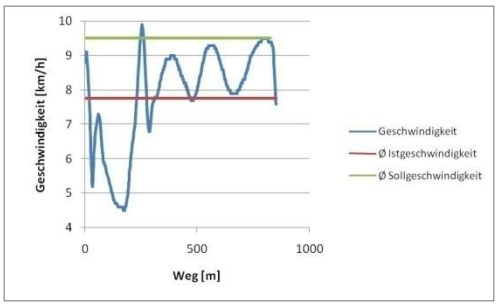


Abbildung 121: Teststrecke 2.0 - Geschwindigkeitsverlauf

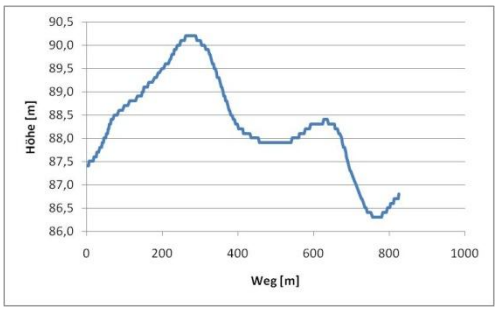


Abbildung 122: Teststrecke 2.0 - Höhenverlauf

Abbildung 121 zeigt einen typischen Geschwindigkeitsverlauf auf Teststrecke 2.0. Ähnlich wie der aufgezeichnete Track, zeichnet sich dieser durch starke Schwankungen aus, deren Ursachen nur sehr schwer benannt werden können, da sie unmittelbar mit den gemessenen Distanzen zusammenhängen.

Die Höhenverläufe zeigen sich hingegen wenig beeinflusst durch die ungenauen GPS-Messungen (siehe Abbildung 122). Der barometrische Höhenmesser sorgt für eine sehr „stabile“ Kurve, die den tatsächlichen Höhenunterschieden in der Realität sehr nahe kommen.

Teststrecke 2.1 (eingeschränkte Sicht durch Bäume)

Auf Teststrecke 2.1 kam es durch Bäume zu kontinuierlichen Abschattungen zu beiden Seiten der Allee. Die angezeigten Strecken sind in Abbildung 123 visualisiert. Der Mittelwert beträgt 1045 m und die Standardabweichung 26,0 m. Es wird eine Streckengenauigkeit von > 94,4 % erreicht. Erneut kommt es zu großen Differenzen beim Ist-Soll-Vergleich der Strecken, aber auch beim Vergleich der aufgezeichneten und der angezeigten Werte (siehe Abbildung 124), ähnlich wie bei Teststrecke 2.0.

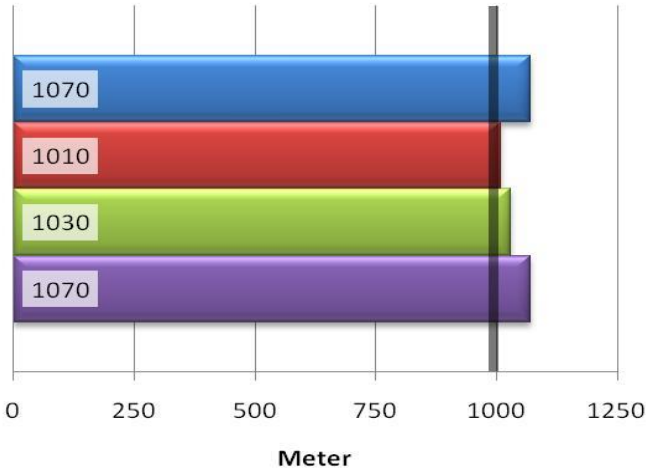


Abbildung 123: Teststrecke 2.1 – Angezeigte Strecken

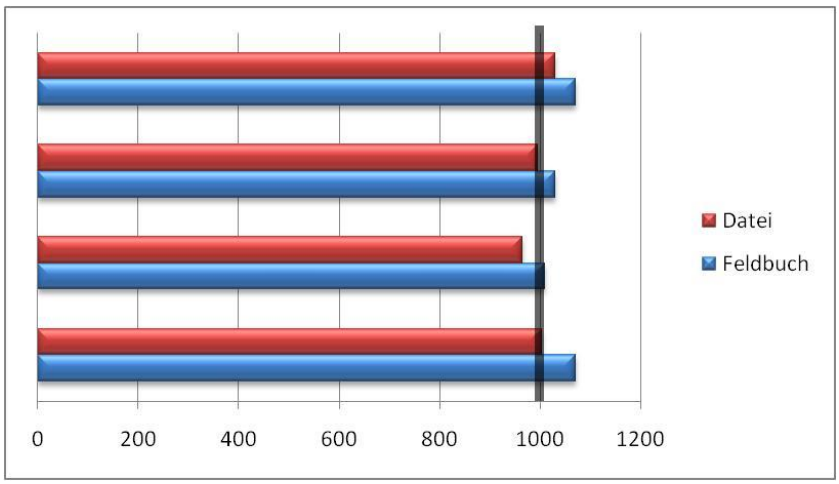


Abbildung 124: Teststrecke 2.1 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Abbildung 125: Teststrecke 2.1 – hohe Überlappungen

Abbildung 126: Teststrecke 2.1 – parallele Verschiebung

Abbildung 127: Teststrecke 2.1 – plötzliche Abweichung

Auf Teststrecke 2.1 kommt es dabei beim FRWD W600 zu unterschiedlichsten Situationen. In Abbildung 125 sind die Abweichungen von der Sollstrecke gering. Die maximale Querabweichung beträgt hier 4,17 m, wobei es sich dabei eher um einen einzelnen Wert in dieser Größenordnung handelt. Anders in Abbildung 126 hier kommt es zu einer kompletten parallelen Verschiebung. Abbildung 127 zeigt daraufhin noch einen Track mit den größten Abweichungen aller Läufe. Eine eindeutige Erklärung für dieses variable Verhalten lässt sich jedoch nicht finden.

Die unbeständigen Messungen werden auch in den aufgezeichneten Geschwindigkeitsverläufen in Abbildung 128 und Abbildung 129 deutlich. Dabei kommt es im ersten Fall zu schlagartigen Änderungen der Geschwindigkeit, wohingegen im zweiten Fall nach dem Start lediglich Werte im Bereich von $\pm$ 0,6 km/h um die Sollgeschwindigkeit auftreten.

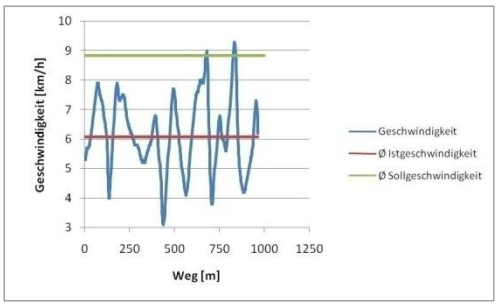


Abbildung 128: Teststrecke 2.1 - Geschwindigkeitsverlauf

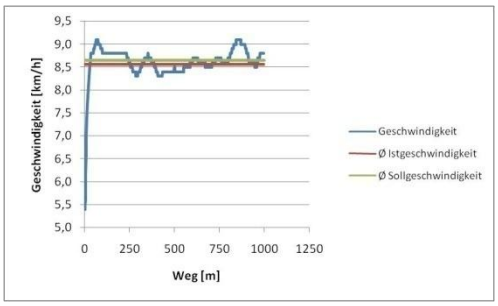


Abbildung 129: Teststrecke 2.1 - Geschwindigkeitsverlauf

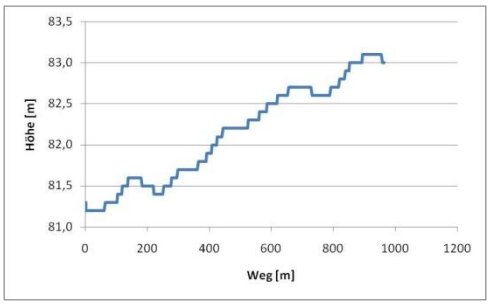


Abbildung 130: Teststrecke 2.1 - Höhenverlauf

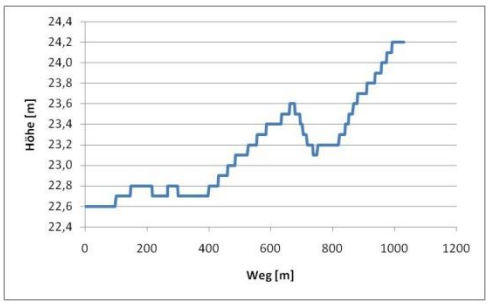


Abbildung 131: Teststrecke 2.1 - Höhenverlauf

Die aufgezeichneten Höhenunterschiede zeichnen sich erneut durch ihre hohe Genauigkeit aus. Die Differenz zwischen Start- und Endpunkt auf der 1000 m langen Strecke mit gleichmäßigem Gefälle beträgt 2,30 m. Die gespeicherten Höhenverläufe in Abbildung 130 und Abbildung 131 weisen jeweils eine relative Höhe von 1,60 m auf. Es kommt dadurch nur zu einer Abweichung von 70 cm zum Sollwert. Einzig und allein das Niveau der Höhen schafft einen Zusammenhang zwischen den stark fehlerbehafteten GPS-Messungen. Hier wird die absolute Höhe zu Beginn der Messung einmal bei 81,40 m und einmal bei 22,60 m angesetzt.

Teststrecke 3.0 (stark eingeschränkte Sicht durch Wald)

Teststrecke 3.0 befindet sich in einem Waldstück und bietet somit stark eingeschränkte Sichten. Die angezeigten Strecken in Abbildung 132 zeigen sehr genaue Werte an. Lediglich der letzte Lauf fällt aus dieser Reihe heraus. Dazu ist jedoch zu sagen, dass die Messung bei diesem Signalabbruch anscheinend vom W600 gestoppt wurde. Ansonsten treten interessanterweise nicht so große Probleme auf wie bei eingeschränkter Sicht in den beiden Tests zuvor. Durch Betrachtung von Abbildung 133 wird auch hier ersichtlich, dass die angezeigten Werte über den aufgezeichneten liegen (maximal 39 m).

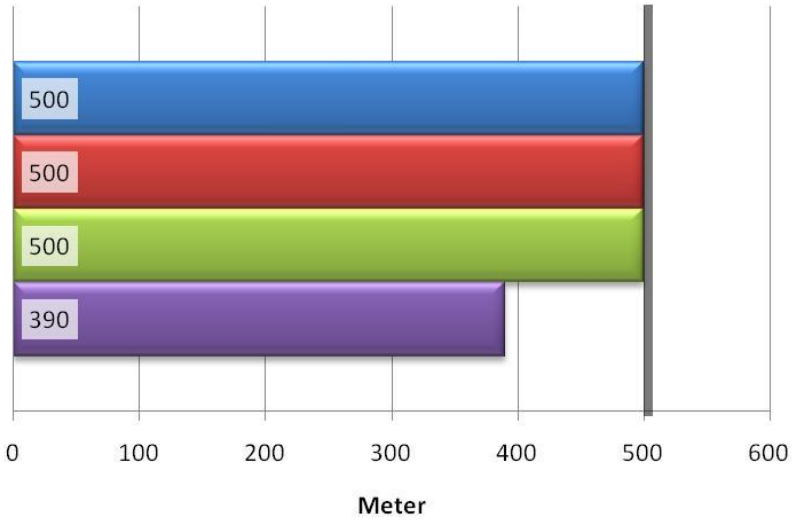


Abbildung 132: Teststrecke 3.0 – Angezeigte Strecken

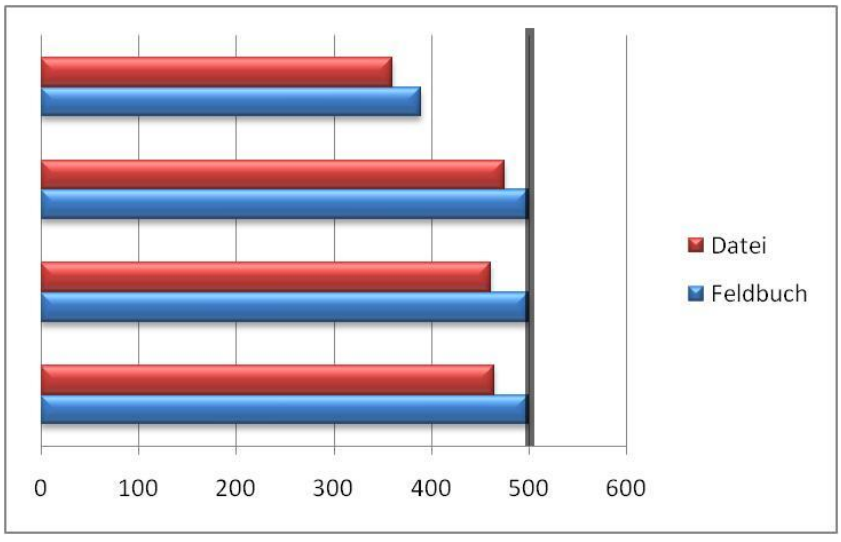


Abbildung 133: Teststrecke 3.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Ähnlich wie bei den Strecken zuvor kommt es im Wald auch zu mehreren verschiedenen Situationen. Die meisten aufgezeichneten Tracks sind wie in Abbildung 134 parallel zur Sollstrecke verschoben, wobei sich die Verschiebung zwischen 15 m und, wie dargestellt, 35 m bewegt. Einige Aufzeichnungen befinden sich dabei auf der rechten Seite des Kurses, andere auf der linken Seite. Dabei wurden jedoch trotzdem immer Distanzen von 500 m angezeigt. Nur beim letzten Lauf in Abbildung 135 sieht man eine fehlerhafte Positionierung bereits am Startpunkt der Strecke im Norden. Hinzu kommt ein verfrühtes Beenden der Datenspeicherung im letzten Abschnitt der Strecke. Auch im Wald ist es schwer, Erklärungen für dieses Verhalten zu finden.

Abbildung 134: Teststrecke 3.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Abbildung 135: Teststrecke 3.0 – Stoppen der Aufzeichnung bei Signalabbruch

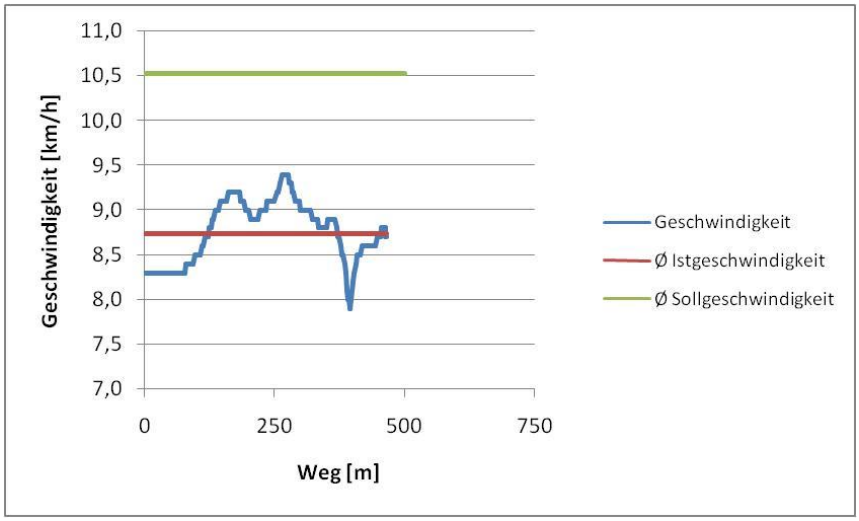


Abbildung 136: Teststrecke 3.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Obwohl es anders zu erwarten war, erscheinen die Geschwindigkeitsverläufe doch eher gleichmäßig, was auf eine Glättung der Messwerte schließen lässt (siehe Abbildung 136). Vergleicht man die Kurve mit Graphen bei eingeschränkten Sichten (Teststrecke 2.0 oder 2.1), weisen diese im Wald weniger Schwankungen auf und verlaufen ähnlich wie die aufgezeichneten Tracks (Abbildung 134 und Abbildung 135) eher geradlinig.

Das Höhenprofil in Abbildung 137 bewegt sich nur zwischen 91,20 m und 91,70 m, also in einem nur sehr kleinen Bereich von 50 cm. Größere Variationen der Höhe kommen erneut nur beim Anfangswert vor, der sich zwischen 67…159 m bewegt.

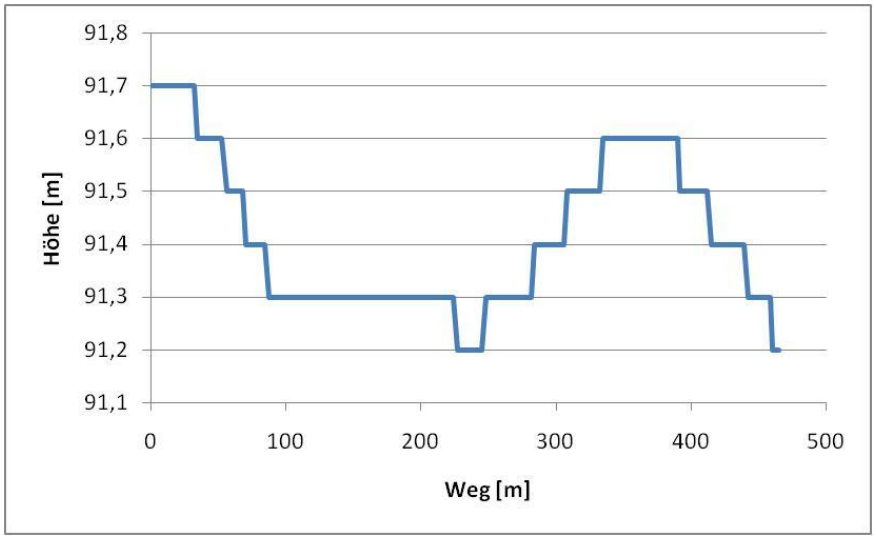


Abbildung 137: Teststrecke 3.0 – Höhenverlauf

Teststrecke 8.0 (kurviger Streckenverlauf)

Teststrecke 8.0 bietet mit den verschiedenen Kurventypen, plötzlichen Spurwechseln sowie einer 180°-Wende viele Möglichkeiten zur Genauigkeitsuntersuchung.

Image © 2007 AeroWest
© 2007 Europa Technologies
Google
Zeiger 32 U 555910.35 m O 5796656.84 m N Höhe 77 m Übertragung 100% Sichthöhe 945 m

Abbildung 138: Teststrecke 8.0 - Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Abbildung 138 zeigt einen Überblick über die gesamte Strecke 8.0. Dazu wurde ein aufgezeichneter Track (gelb) beispielhaft ausgewählt um ihn mit der Sollstrecke (pink) zu vergleichen. Die Bedingungen für den Empfang von GPS-Signalen sind bei diesen Tests wieder besser, da es selten zu größeren Abschattungen kommt. Dies zeigt sich auch in den aufgezeichneten Tracks. Die Querabweichungen befinden sich wieder in einem kleineren Bereich bis maximal 8 m. Außerdem nehmen sämtliche registrierte Strecken in der Übersicht eine ähnliche Gestalt an, wobei es bei einem Lauf wieder zu einer nicht unerheblichen Verschiebung des Startpunktes kommt. In Abbildung 139 wurde eine Kurve durch einen Punkt und damit durch eine 90° Drehung definiert. Es kommt zu einer starken Glättung des Streckenverlaufs, so dass letztendlich auch kein sichtbarer Unterschied mehr zu einer leicht abgerundeten Kurve wie in Abbildung 140 existiert.

Abbildung 139: 90°-Drehungen in einem Punkt

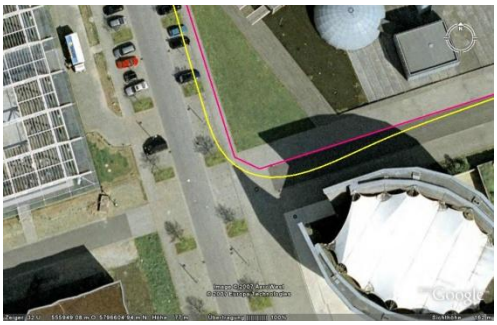


Abbildung 140: Abgerundete Kurve (2 Punkte)

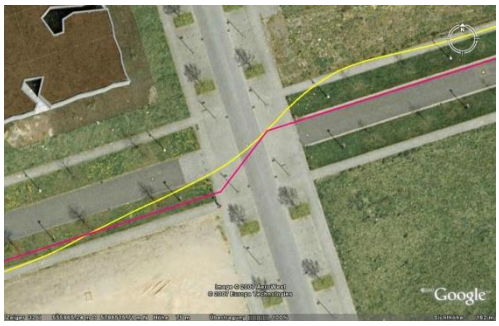


Abbildung 141: Plötzlicher Spurwechsel

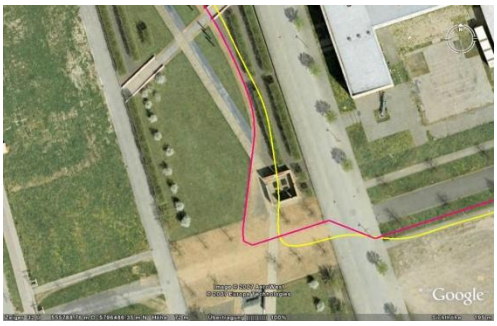


Abbildung 142: Stark abgerundete Kurve

Der Spurwechsel in Abbildung 141 wird sogar so stark geglättet, dass dieser kaum noch zu erkennen ist. Bei einer stark abgerundeten Kurve wie in Abbildung 142 passt sich der aufgezeichnete Kurvenverlauf wiederum sehr gut der Sollstrecke an, auch wenn dieser hier durch den hohen Glättungsgrad zu Beginn der langgezogenen Kurve noch verschoben ist. Abbildung 143 zeigt eine 180°-Wende in einem Punkt (kurz vor dem Pavillon in Bildmitte). Dabei werden einige gemessene Koordinaten scheinbar aus der Aufzeichnung herausgenommen, so dass der Weg hier „abgeschnitten“ wirkt. Im weiteren Verlauf erkennt man erneut den eingesetzten Glättungsfilter. Die eingestellte Aktualisierungsrate von 1 Sekunde lässt sich hier an keiner Stelle durch einzelne miteinander verbundene Punkte erkennen. Durch die vermutlich verwendeten ausgleichenden Splines werden anscheinend zusätzlich noch einige Punkte interpoliert, damit es zu einem so „runden“ Streckenverlauf kommen kann.

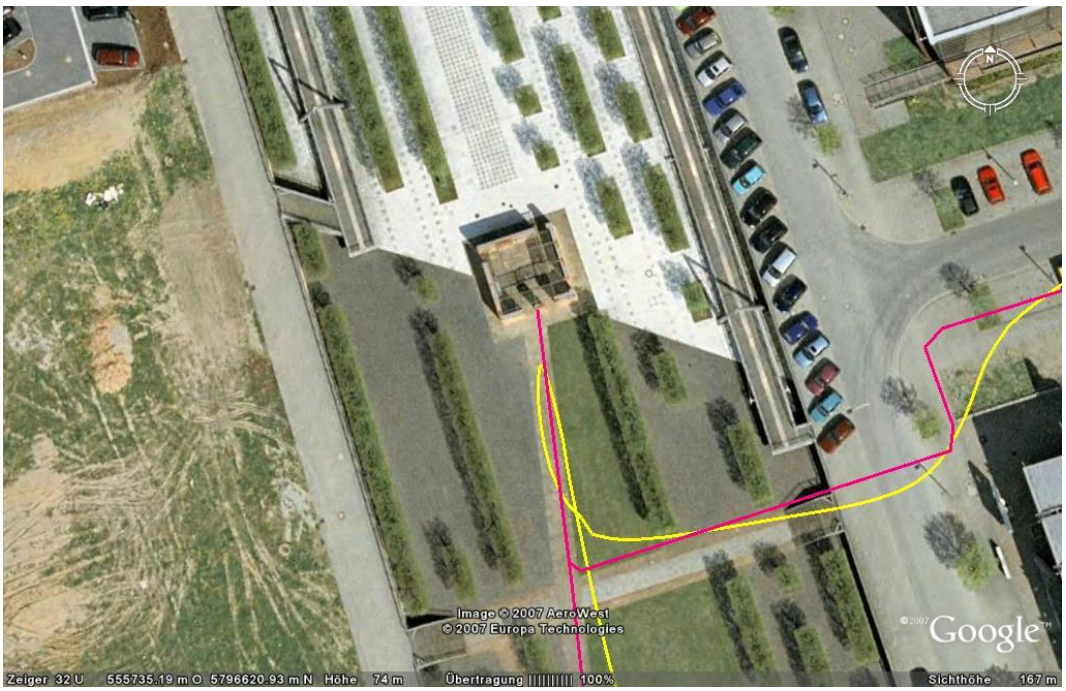


Image © 2007 AeroWest
© 2007 Europa Technologies
Google
Zeiger 32 U 555735.19 m O 5796620.93 m N Höhe 74 m Übertragung 100% Sichthöhe 167 m

Abbildung 143: Schnelle 180°-Wende in einem Punkt

Auskunft über die Genauigkeit des Geschwindigkeits- und Distanzmessers FRWD W600 sollten aber vor allen Dingen die angezeigten Strecken geben (Abbildung 144). Der Mittelwert der angezeigten Distanzen beträgt 1070 m (1081,78 m Solldistanz), die Standardabweichung liegt allerdings bei 41,23 m, was auf den ersten Lauf und die besagte Verschiebung der Startkoordinate zurückzuführen ist. Vernachlässigt man diesen „Ausreißer“, so wird eine Streckengenauigkeit > 98,3 % erreicht. Auch auf Teststrecke 8.0 kommt es zu Differenzen zwischen aufgezeichnetem und angezeigtem Wert, wobei die Distanzen, die während der Tests notiert wurden, wesentlich besser zur Sollstrecke passen als die erneut kleineren aufgezeichneten Werte (siehe Abbildung 145).

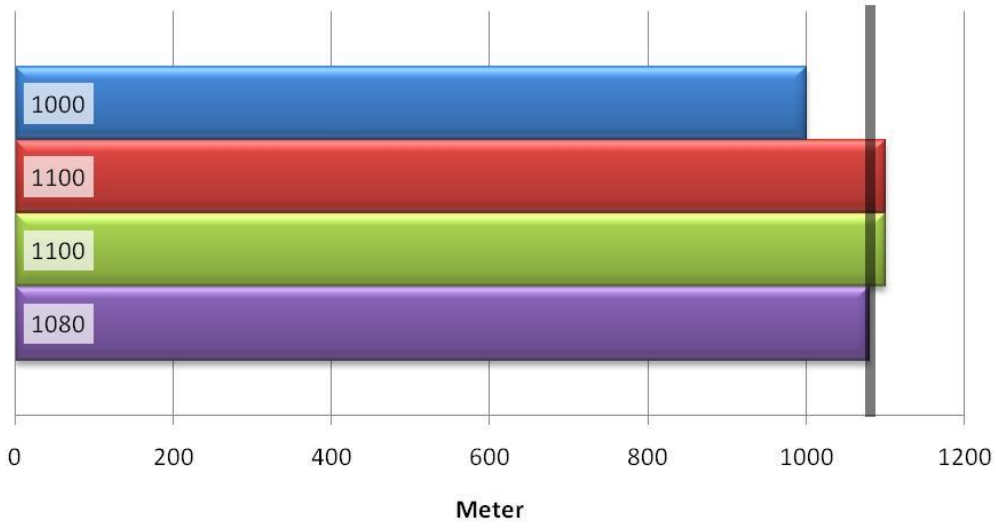


Abbildung 144: Teststrecke 8.0 – Angezeigte Strecken

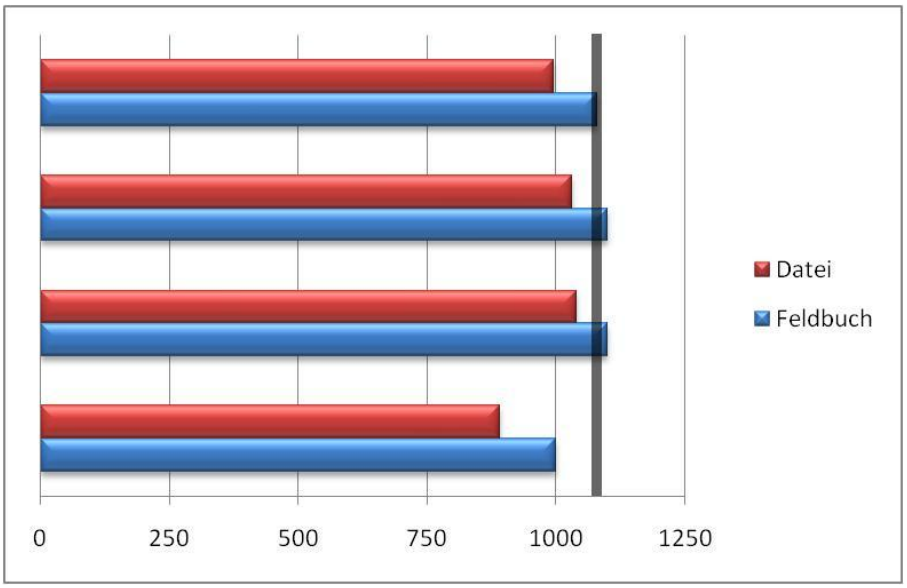


Abbildung 145: Teststrecke 8.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

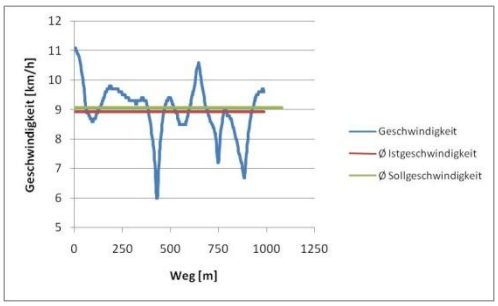


Abbildung 146: Teststrecke 8.0 - Geschwindigkeitsverlauf

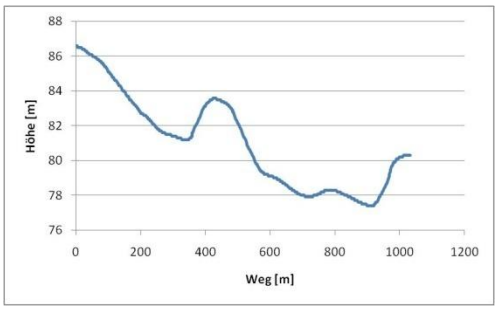


Abbildung 147: Teststrecke 8.0 - Höhenverlauf

Die Geschwindigkeitsverläufe, wie in Abbildung 146 dargestellt, weisen zwar alle große Schwankungen auf, wofür jedoch die unterschiedliche Topographie mit An- und Abstiegen eine Ursache darstellen könnte. Hierdurch wurde die Einhaltung einer gleichmäßigen Geschwindigkeit bei den Läufen erschwert.

Das Höhenprofil in Abbildung 147 zeigt sich zum wiederholten Male gleichmäßig und beschreibt die besagte Topographie recht gut. Unter diesen Bedingungen befindet sich die absolute Höhe zu Beginn der Läufe jeweils auf demselben Niveau.

Teststrecke 9.0/9.1 (Signalunterbrechung/-abbruch)

Auf den Teststrecken 9.0 und 9.1 sollte die Genauigkeit bei Signalabbruch bzw. Signalunterbrechung untersucht werden. Dafür wurden zwei verschiedene Brücken gewählt, die für den gewünschten Effekt sorgen sollten (siehe Teststrecken). Die Tests wurden in zwei Arten unterteilt: Der Brücken- bzw. Tunneldurchlauf zur Simulation einer vorrübergehenden Signalunterbrechung und das Anhalten unter der jeweiligen Brückenmitte. Bei Letzterem ging es darum, das weitere Verhalten der Geräte innerhalb von 30 Sekunden nach Signalabbruch zu analysieren.

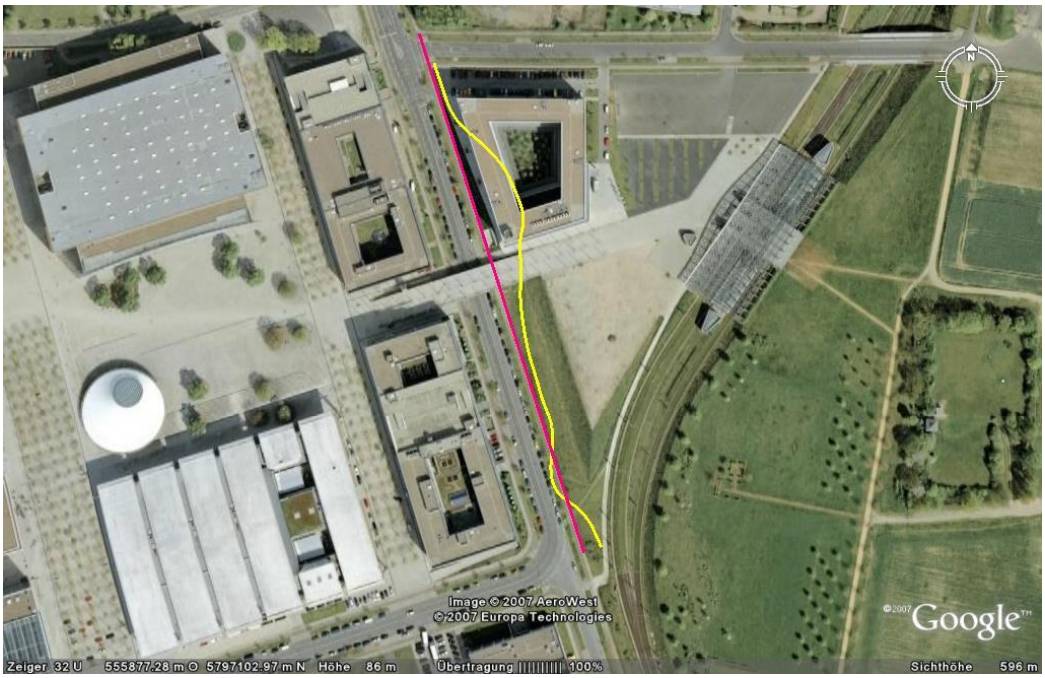


Image © 2007 AeroWest
© 2007 Europa Technologies
©2007 Google
Zeiger 32 U 555877.28 m O 5797102.97 m N Höhe 86 m Übertragung 100%
Sichthöhe 596 m

Abbildung 148: Teststrecke 9.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

In Abbildung 148 wird einer der Tunneldurchläufe dargestellt. Durch die kurzzeitige Signalunterbrechung werden größere Abweichungen von der Sollstrecke (pink) erzeugt, was sich auch in den gemessenen Geschwindigkeiten wiederspiegelt (siehe Abbildung 149). Durch die starke Glättung des Streckenverlaufs kann nur erahnt werden, welche Koordinaten während des Signalabbruchs berechnet wurden. Die maximale Querabweichung liegt bei 25,47 m.

Das Höhenprofil in Abbildung 150 zeigt einen Höhenunterschied von 3,40 m (tatsächlicher Höhenunterschied: 3,85 m). Die jeweiligen Anfangshöhen schwanken hier jedoch zwischen 78…211 m, was hohe Unsicherheiten bei der Bestimmung der Höhenkomponente per GPS deutlich macht.

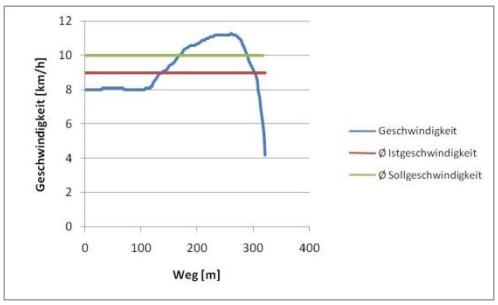


Abbildung 149: Teststrecke 9.0 – Geschwindigkeitsverlauf (Durchlauf)

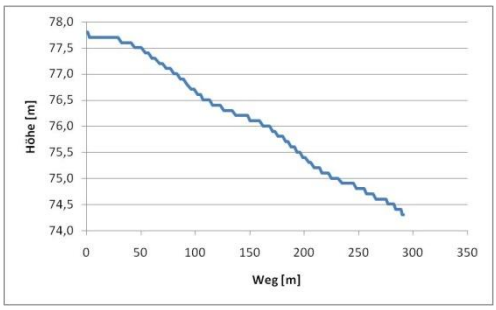


Abbildung 150: Teststrecke 9.0 – Höhenverlauf (Durchlauf)

Die angezeigten Strecken von Teststrecke 9.0 variieren erneut stark (siehe Abbildung 151). Während der Tests auf Strecke 9.1, mit einer eingemessenen Länge von 277 m, kam es zur Erkenntnis, dass der FRWD W600 erst Distanzen ab 300 m speichert, wobei die Anzeige aber auch die optischen und akustischen Signale keinerlei Hinweise auf dieses Verhalten lieferten. Die Daten werden wohl zunächst auch registriert, aber nach Abgleich der Distanz (< 300 m) einfach aus dem Speicher gelöscht bzw. gar nicht erst richtig abgespeichert. Dadurch kam es auf dieser Strecke zu einer erhöhten Anzahl an Läufen, wie in Abbildung 152 zu sehen ist. Hier beträgt der Mittelwert 281 m, wobei die Streckengenauigkeit nur bei > 95,5 % liegt.

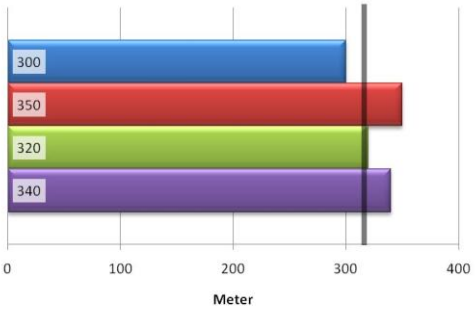


Abbildung 151: Teststrecke 9.0 – Angezeigte Strecken

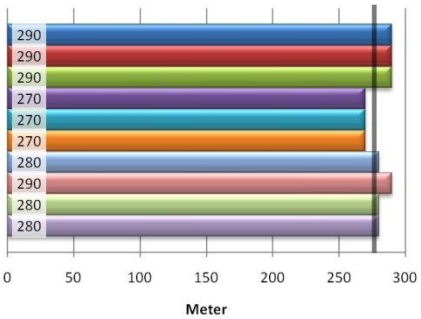


Abbildung 152: Teststrecke 9.1 – Angezeigte Strecken

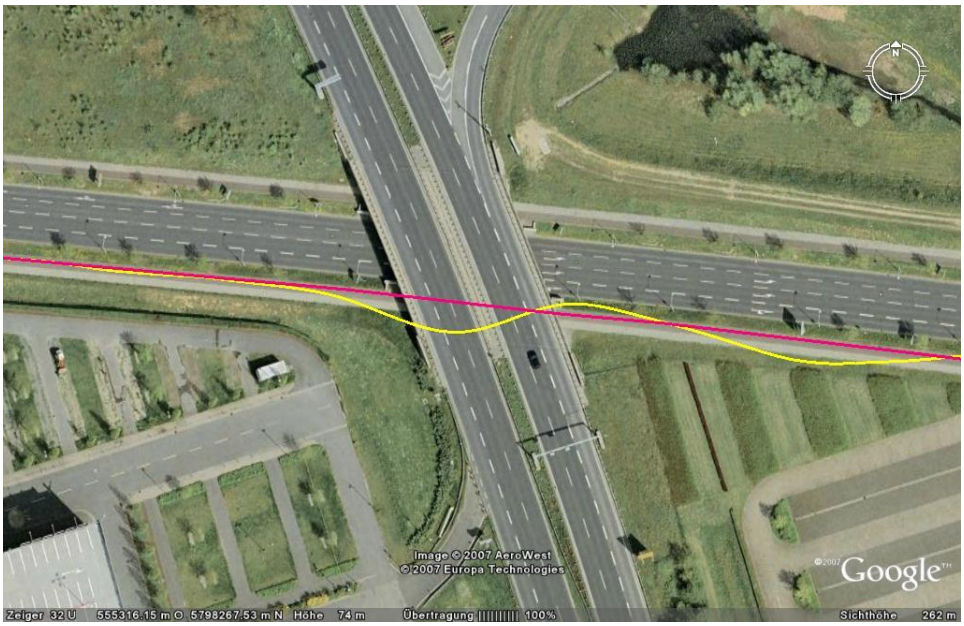


Image © 2007 AeroWest
© 2007 Europa Technologies
Google
Zeiger 32 U 555316.15 m O 5798267.53 m N Höhe 74 m Übertragung 100% Sichthöhe 262 m

Abbildung 153: Teststrecke 9.1 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Die Brücke des Messeschnellwegs, die den Fußweg entlang der Hermesallee und damit die Teststrecke 9.1 überführt, hat an dieser Stelle eine Breite von ca. 35 m. Hier kommt es zu einer längeren Signalunterbrechung. In Abbildung 153 lässt sich bezüglich des aufgezeichneten Tracks ein ähnlicher Effekt wie auf Teststrecke 9.0 beobachten. Ab dem Moment der Unterbrechung kommt es zu Unsicherheiten. Die Position wird zwar weiterhin vorausberechnet, erfährt aber anscheinend diverse Störeinflüsse, so dass es zu keiner linearen Prädiktion kommt. Im Gegensatz zur Teststrecke 9.0 sind die Auswirkungen dieser Signalunterbrechung nicht so gravierend. Hier kommt es nur zu einer maximalen Querabweichung von 6,59 m. Da der FRWD W600 auch zuvor schon Probleme bei der Positionierung unter verschlechterten Bedingungen hatte, wie sie beispielsweise bei Teststrecke 9.0 auftreten, kommt es hier durch optimale Bedingungen nur zu kleineren Abweichungen durch die Signalunterbrechung, was auch der Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 154 aufzeigt. Durch den Einsatz der barometrischen Höhenmessung zeigt sich das Höhenprofil in Abbildung 155 wieder unbeeinflusst von der zwischenzeitlichen Unterbrechung des Signals.

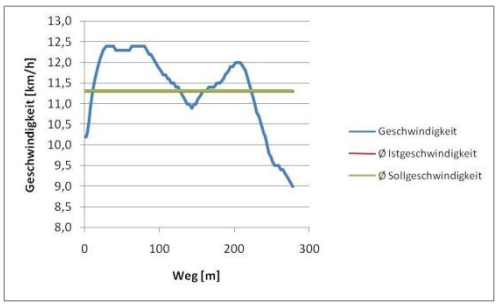


Abbildung 154: Teststrecke 9.1 – Geschwindigkeitsverlauf (Durchlauf)

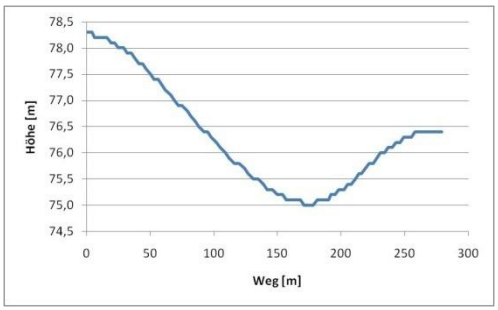


Abbildung 155: Teststrecke 9.1 – Höhenverlauf (Durchlauf)

Auf beiden Strecken lässt sich nun auch noch das Verhalten des W600 bei Signalabbruch untersuchen. Während Abbildung 156 und Abbildung 157 einen der aufgezeichneten Streckenverläufe zeigen, können die dazugehörigen Werte aus Abbildung 158 und Abbildung 159 entnommen werden. Bei den angezeigten Strecken ist zu erkennen, dass diese nach den 30 Sekunden Standzeit einfach weiter vorausberechnet und so ausnahmslos größer geworden sind. Die Ursache kann man auch in den beiden aufgezeichneten Tracks erkennen. Statt einer linearen Prädiktion weisen alle gespeicherten Strecken starke seitliche Abweichungen auf.

Die berechneten Geschwindigkeiten sinken meist langsam ab, wie in Abbildung 160 zu sehen ist. Es kann jedoch auch zu einer starken Verringerung mit anschließend schnell größer werdenden Geschwindigkeiten wie in Abbildung 161 kommen.

Abbildung 162 und Abbildung 163 stellen zwei Höhenprofile dar, die sehr exakte Höhenunterschiede aufweisen. Teststrecke 9.0 zeigt eine hohe Varianz der Anfangshöhen auf, was bei Teststrecke 9.1 nicht der Fall ist.

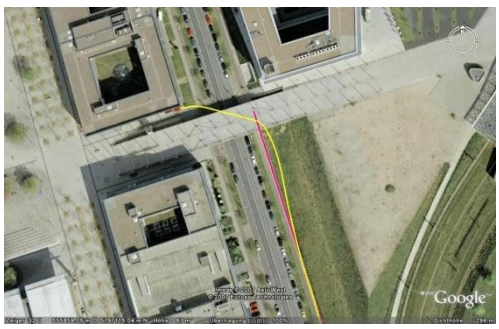


Abbildung 156: Teststrecke 9.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

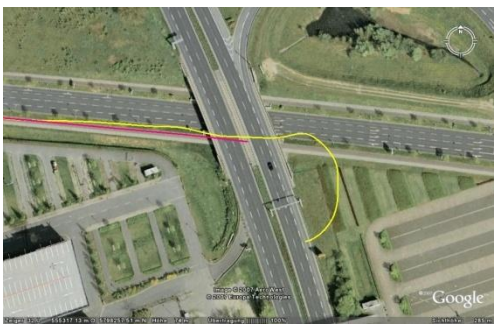


Abbildung 157: Teststrecke 9.1 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

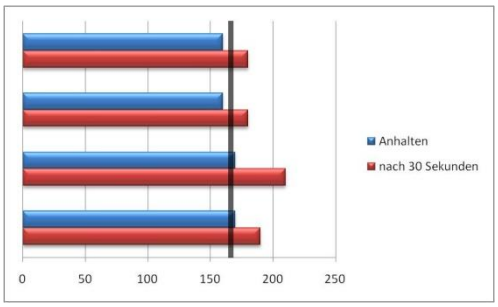


Abbildung 158: Teststrecke 9.0 – Angezeigte Strecken

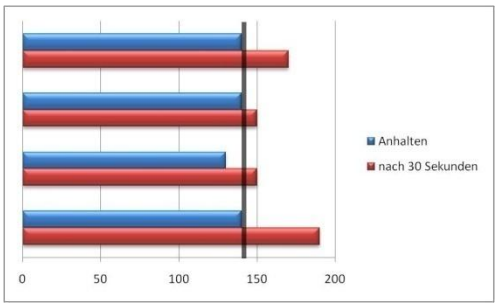


Abbildung 159: Teststrecke 9.1 – Angezeigte Strecken

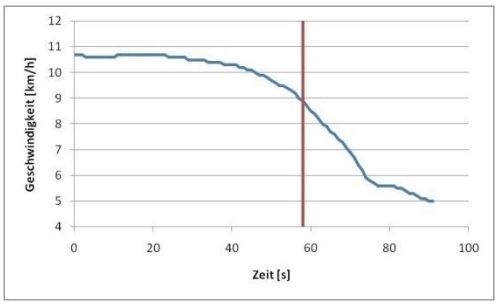


Abbildung 160: Teststrecke 9.0 – Geschwindigkeitsverlauf (Signalabbruch)

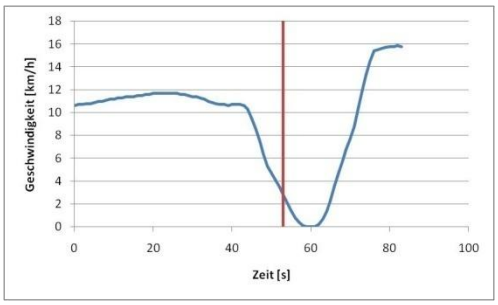


Abbildung 161: Teststrecke 9.0 – Geschwindigkeitsverlauf (Signalabbruch)

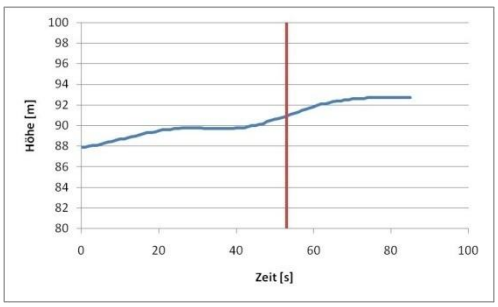


Abbildung 162: Teststrecke 9.0 – Höhenverlauf (Signalabbruch)

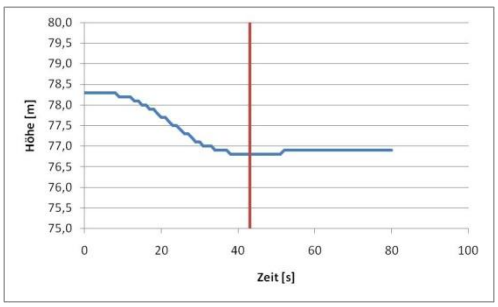


Abbildung 163: Teststrecke 9.1 – Höhenverlauf (Signalabbruch)

Teststrecke 10.0 (plötzliches Anhalten)

Mit Hilfe von Teststrecke 10.0 kann das Verhalten des W600 bei plötzlichem Anhalten getestet werden. Es kommt zu keinerlei sonstiger Fehlereinflüsse wie z.B. Abschattungen. In Abbildung 164 wird ersichtlich, dass sich die Distanzen bis zum Haltepunkt und die endgültig angezeigten Strecken (nach 30 Sekunden) trotzdem unterscheiden.

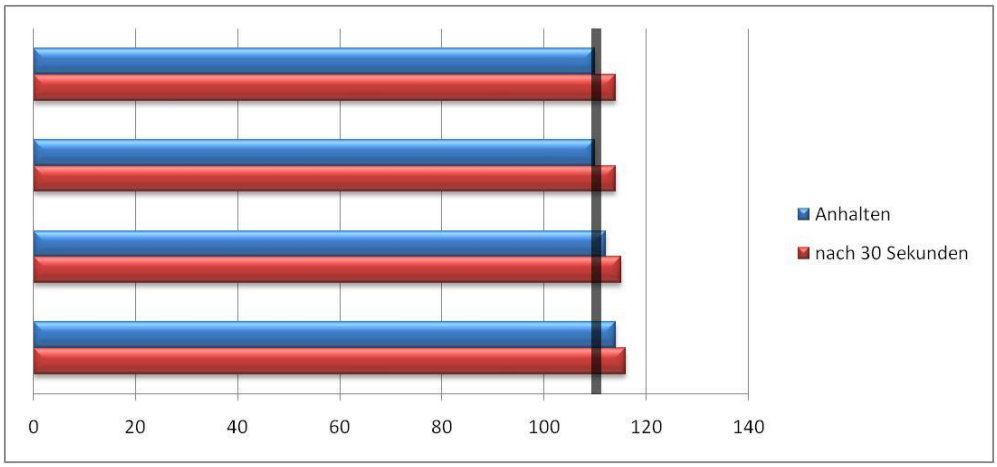


Abbildung 164: Teststrecke 10.0 – Angezeigte Strecken (Sollstrecke 110 m)

In Abbildung 165 erkennt man wieder eindeutig eine Glättung der Geschwindigkeitskurve. Bis zum Haltepunkt bei 38 Sekunden sollte die Geschwindigkeit noch nicht abnehmen, da an dieser Stelle ein abrupter Abbruch der Läufe erfolgte. Im Gegensatz dazu müsste die Geschwindigkeit ab diesem Zeitpunkt durch die fehlende Bewegung einen Wert von 0 annehmen. Da dies nach 5 Sekunden auch der Fall ist, kann aber nicht genau gesagt werden, ob es sich dabei um einen Fehler, verursacht durch Glättung der gesamten Kurve oder durch Vorausberechnung ohne anschließende Filterung, handelt.

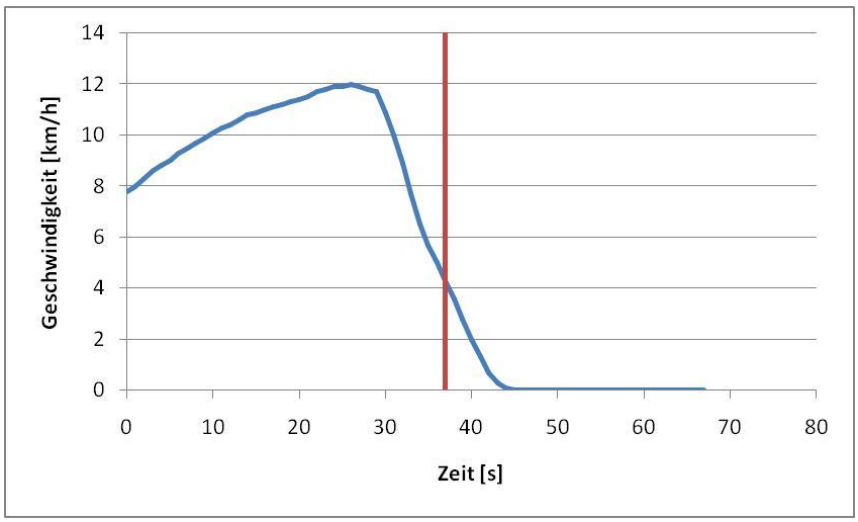


Abbildung 165: Teststrecke 10.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Die Höhe variiert nach dem Erreichen des Haltepunktes nur noch in den ersten 2 Sekunden (siehe Abbildung 166). Im Anschluss daran kommt es zu keinen Schwankungen mehr. Fraglich ist hierbei ebenfalls, ob der Höhenverlauf auch einem Filter unterliegt. Betrachtet man den Höhenverlauf vor dem Zeitpunkt des Anhaltens, sinkt dieser stetig ab. Der sehr kleine Höhenunterscheid von 10 cm könnte dabei auch interpoliert sein. Festzustellen bleibt jedoch vordergründig, dass es bei allen Aufzeichnungen auf dieser Strecke noch zu kleinen Änderungen der Höhe (10 cm) nach Beenden der Laufbewegung kommt.

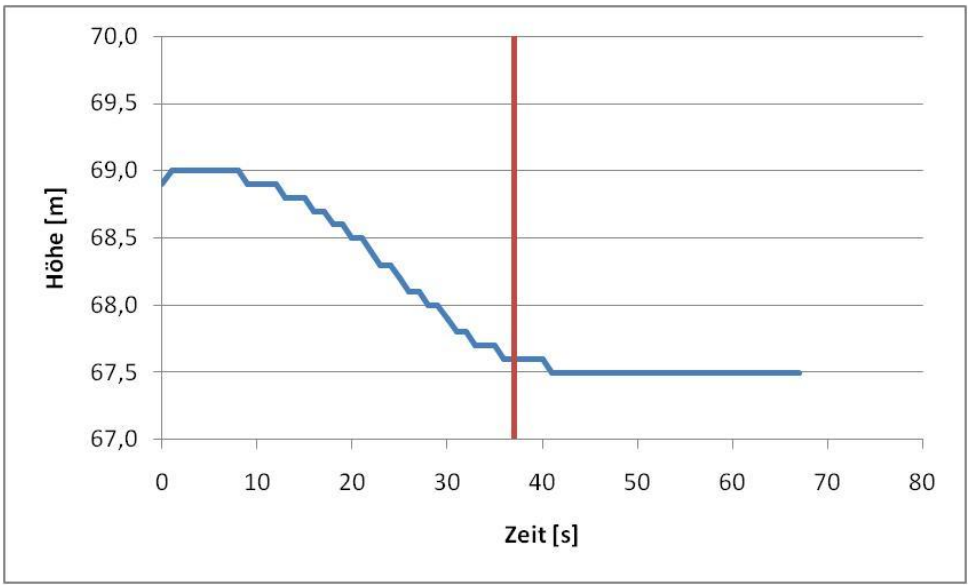


Abbildung 166: Teststrecke 10.0 – Höhenverlauf

Testpfeiler MD (Positionsgenauigkeit)

Zur Untersuchung der absoluten Lage- und Höhengenauigkeit wurde der W600 auf dem Messdach des Geodätischen Instituts der Universität Hannover getestet. Die dort aufgestellten Pfeiler sind koordinatenmäßig exakt bekannt, was einen Soll-Ist-Vergleich ermöglicht. Die Dauer der Aufzeichnung betrug 60 Minuten. Beim FRWD W600 zeichnen sich dabei verschiedene Ergebnisse ab.

Fall 1:

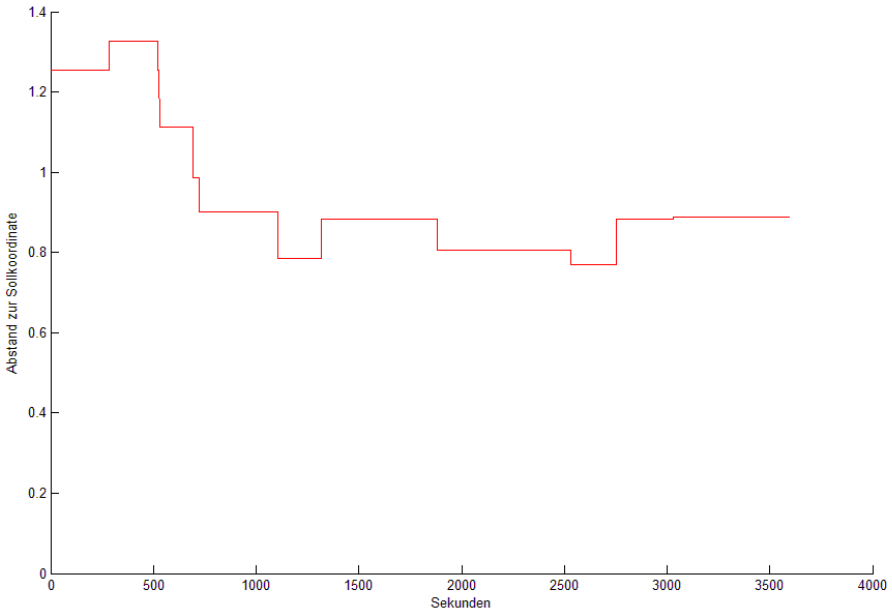


Abbildung 167: Messdach – Lagegenauigkeit

Abbildung 167 zeigt die jeweiligen Abstände zur Sollkoordinate in Metern über die Zeit gesehen. Es ergibt sich ein Mittelwert der Abweichungen vom Sollpunkt von 0,93 m, wobei sich die Werte in einem Bereich zwischen 0,77 m und 1,30 m bewegen. Die Standardabweichung beträgt 0,16 m. Einen Überblick über die Verteilung der bestimmten Positionen erhält man in Abbildung 168.

Laut Herstellerangaben soll eine Positionsgenauigkeit von < 3 m erreicht werden, was hier der Fall ist. Aber auch die abgeschätzte erwartete Genauigkeit von < 5 m bei Messungen mit WAAS-/EGNOS-Korrekturdaten wird eingehalten. Die Ergebnisse sind als etwas ungewöhnlich anzusehen, wenn man die häufig fehlerbehafteten Positionierungen aus den Tests zuvor betrachtet. Bei einer weiteren Durchführung des gleichen Tests wurden dabei die in Fall 2 beschriebenen Positionen bzw. Genauigkeiten ermittelt.

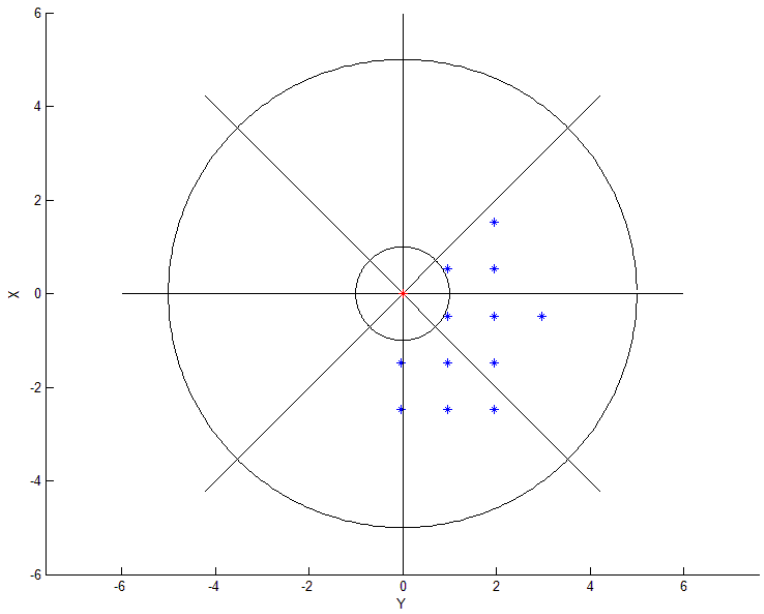


Abbildung 168: Messdach – Positionsgenauigkeit

Fall 2:

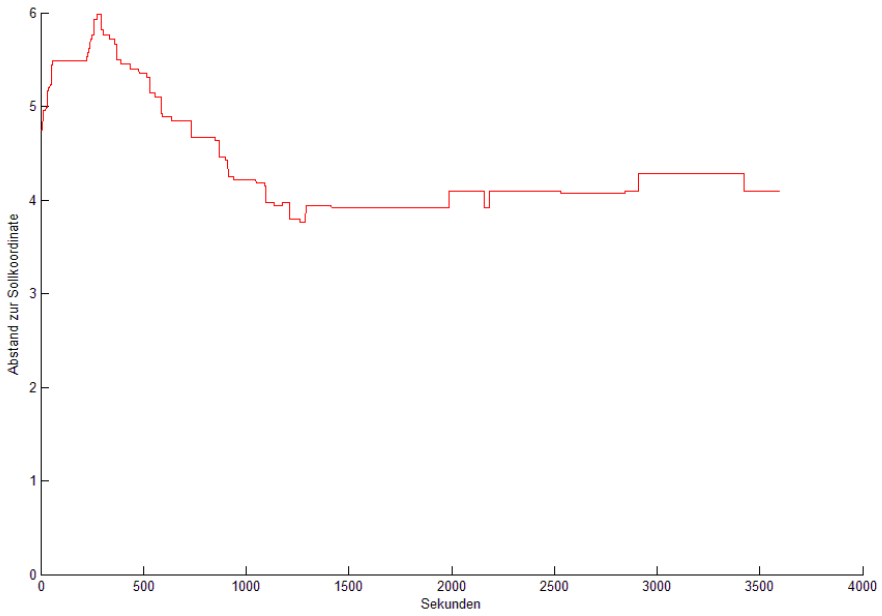


Abbildung 169: Messdach – Lagegenauigkeit

In diesem Fall sind die Abstände zur Sollkoordinate in Abbildung 169 größer. Es ergibt sich ein Mittelwert der Abweichungen vom Sollpunkt von 4,36 m, wobei sich die Werte in einem Bereich zwischen 3,76 m und 5,98 m bewegen. Die Standardabweichung beträgt 0,54 m. Deutlich wird vor allen Dingen, dass sich die Position kaum verändert.

Sie besitzt dabei jedoch eine niedrige Präzision. Einen Überblick über darüber erhält man in Abbildung 170.

Die Positionsgenauigkeit von < 3 m, die der Hersteller für optimale Bedingungen voraussagt, können hier nicht eingehalten werden. Wie sich schon bei den vorangegangenen Tests zeigte, besitzt der FRWD W600 eine sehr variable Genauigkeit bei der Bestimmung von absoluten Werten.

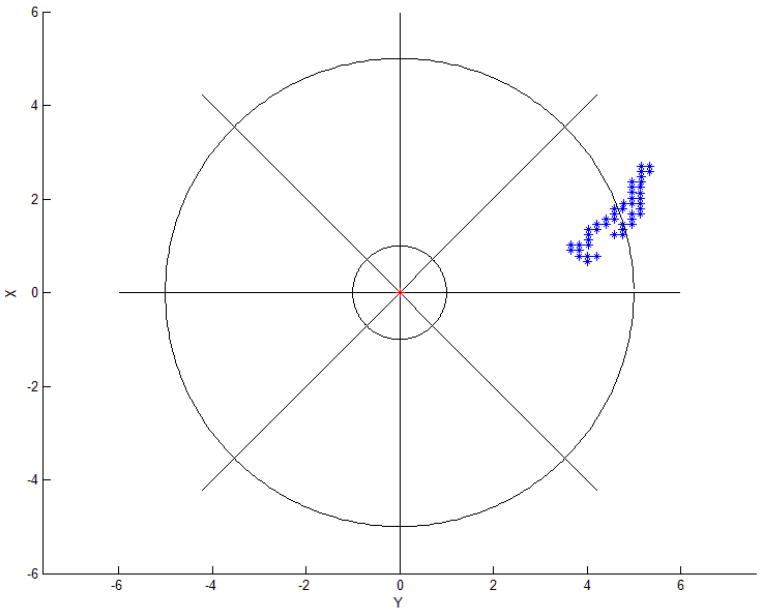


Abbildung 170: Messdach – Positionsgenauigkeit

Bei dem gleichzeitigen Vergleich der absoluten Sollhöhen mit den gemessenen Höhen in Abbildung 171 und Abbildung 172 erkennt man eine eindeutig falsch bestimmte Starthöhe. Im ersten Fall beginnt die Messung bei – 55,30 m, während die Anfangshöhe im zweiten Fall mit -75,80 m registriert wird. Obwohl es zuvor schon häufig zu Unsicherheiten der Höhenbestimmung kam, wurden noch nie negative Höhen aufgezeichnet. Merkwürdig ist vor allem, dass die Armbanduhr des W600 während der Tests eine sehr exakte Höhe anzeigte, wobei es sich nicht nur um eine Umkehrung des Vorzeichens handelte.

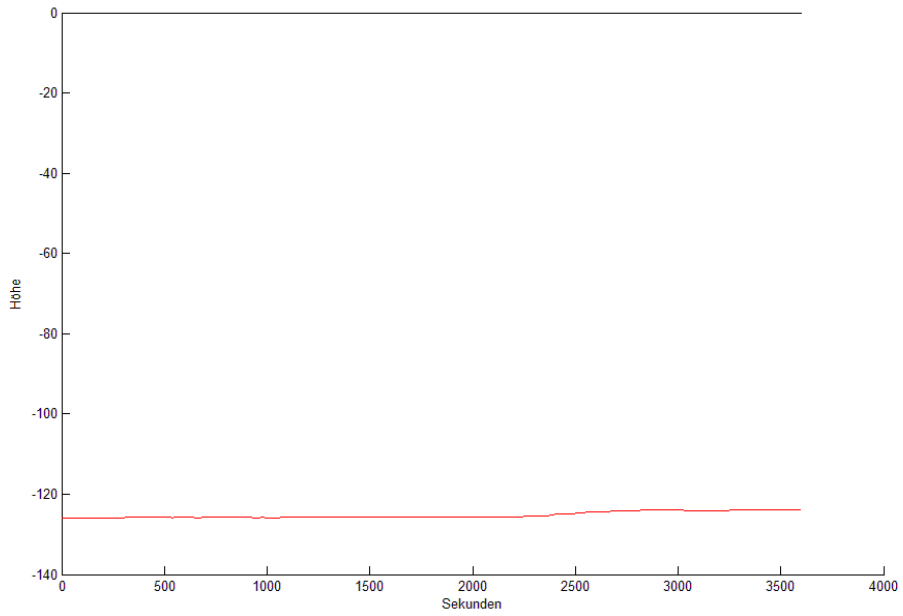


Abbildung 171: Messdach – Höhengenauigkeit Fall 1

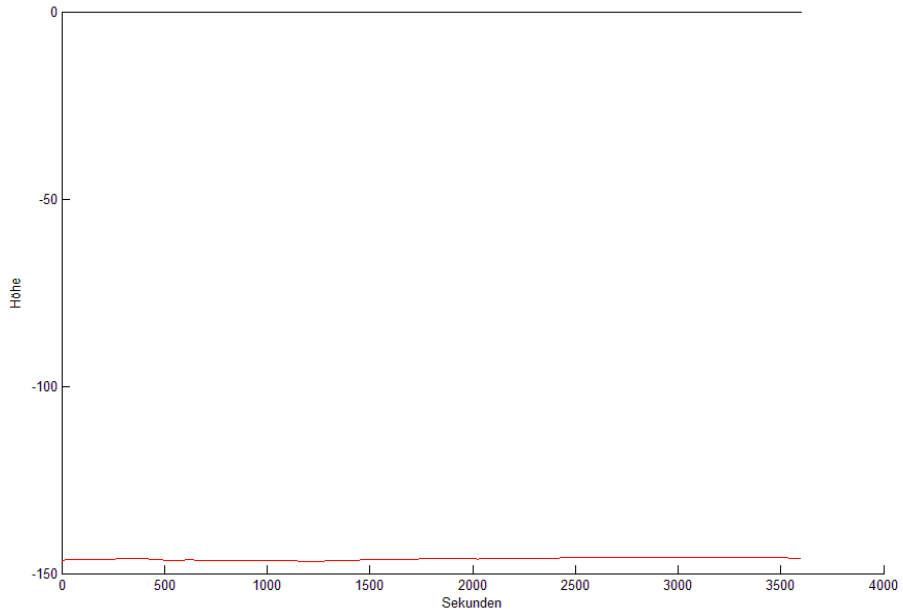


Abbildung 172: Messdach – Höhengenauigkeit Fall 2

4.2.5 Messprinzip barometrische Höhenmessung

Zur Untersuchung der Genauigkeit des eingesetzten barometrischen Höhenmessers wurden Tests im Außenbereich (Teststrecke 4.0 und 4.1) durchgeführt. Durch die Notwendigkeit einer Kalibrierung des Höhenmessers durch Bestimmung einer absoluten Anfangshöhe per GPS war es nicht möglich Tests innerhalb eines Gebäudes durchzuführen.

In Abbildung 173 werden die relativen Höhen reduziert auf die Anfangshöhe dargestellt. Die Überquerung des künstlich angelegten Hügels (siehe Teststrecke 4.0) verläuft recht gleichmäßig, weshalb hier zunächst einmal nur an signifikanten Stellen, sowohl zur Einmessung der Strecke als auch bei den Tests, Höhen gemessen bzw. abgelesen wurden. Es kommt dabei zu sehr großen Abweichungen.

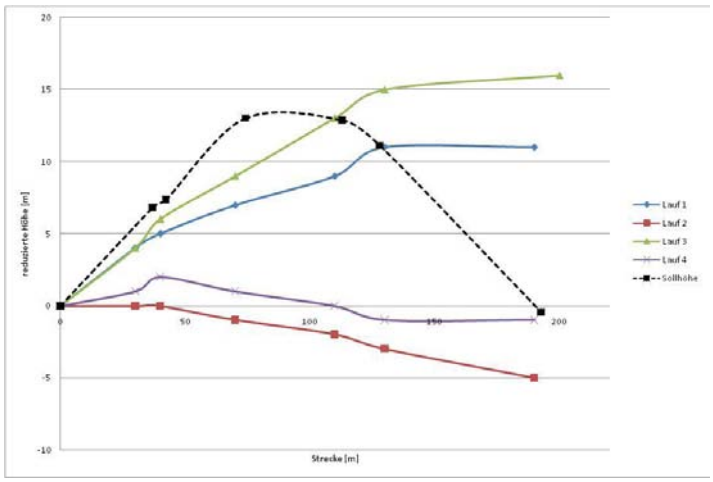


Abbildung 173: Teststrecke 4.0 – Relative Höhen

Abbildung 174 zeigt ein typisches aufgezeichnetes Höhenprofil. Der Höhenunterschied von etwa 12 m kann hier auf beiden Seiten gut abgelesen werden und übersteigt die vom Hersteller angegebene Genauigkeit von < 1 m (relative Höhen). Verglichen mit der relativen Sollhöhe, auf den Startpunkt reduziert, geben alle Läufe ein ähnliches Bild ab (siehe Abbildung 175). Komisch ist jedoch der Unterschied zwischen Aufzeichnung und Anzeige.

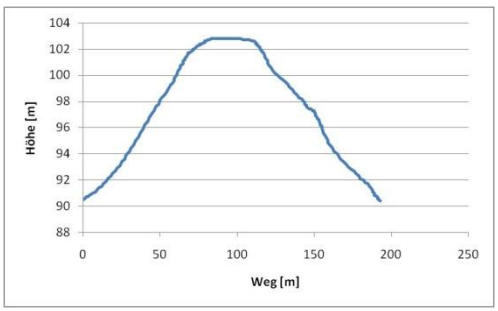


Abbildung 174: Teststrecke 4.0 – Einzelner Höhenverlauf

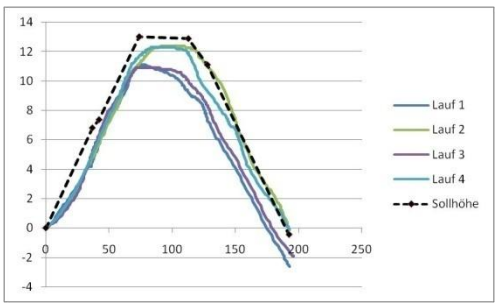


Abbildung 175: Teststrecke 4.0 – Vergleich aller Läufe mit relativer Sollhöhe

Teststrecke 4.1 bietet eine gleichmäßige Steigung bzw. ein gleichmäßiges Gefälle über eine längere Strecke von 259 m (siehe Teststrecken). Hier fanden weitere Genauigkeitsuntersuchungen statt. Dabei wurden zwei Höhen genau gemessen, wodurch ein Höhenunterschied von 12,41 m zustande kam. An diesen zwei Stellen fanden daraufhin auch die Ablesungen statt. Aus den Messungen resultiert der Graph in Abbildung 176. Die Ergebnisse sind ähnlich wie bei Teststrecke 4.0. Bei Lauf 3 ändert sich der angezeigte Höhenwert merkwürdigerweise überhaupt nicht.

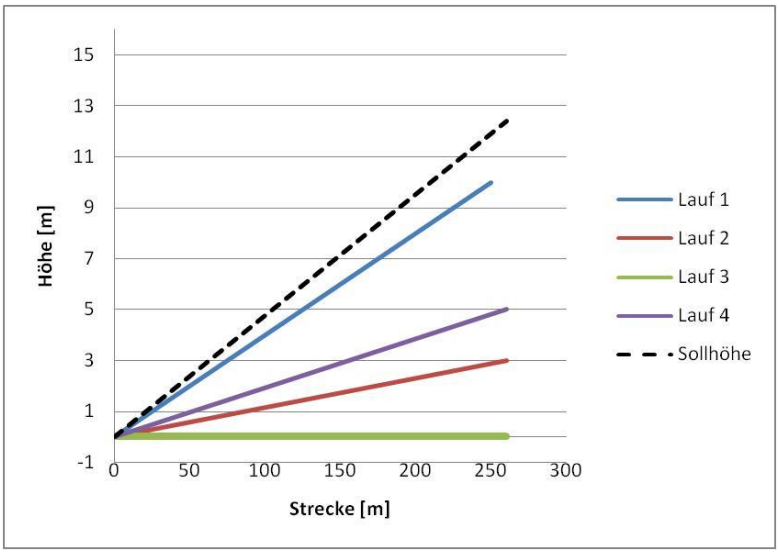


Abbildung 176: Teststrecke 4.1 – Relative Höhen

Abbildung 177 zeigt das Höhenprofil, was für Lauf 3 aufgezeichnet wurde. Hier kann man sehr gut einen Höhenunterschied ablesen, der bis auf einige Zentimeter an den tatsächlichen Wert herankommt. Zudem ist der Verlauf auch der Strecke nach entsprechend gleichmäßig. Da es sich in diesem Fall gerade um den besagten 3. Lauf handelt, welcher sich durch die gleichbleibende Höhenanzeige bemerkbar machte, kann hier eigentlich nur von einem Übertragungsfehler zwischen Recorder und Uhr ausgegangen werden. Abbildung 178 zeigt alle aufgezeichneten Läufe mit ihren jeweiligen Höhenprofilen, auf die Starthöhe reduziert. In allen Fällen wird dabei auf den Endpunkt bezogen eine relative Höhengenauigkeit < 1 m erzielt.

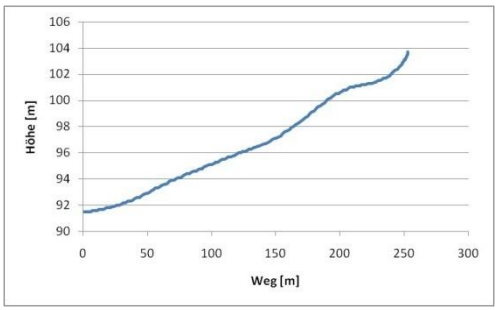


Abbildung 177: Teststrecke 4.1 – Einzelner Höhenverlauf

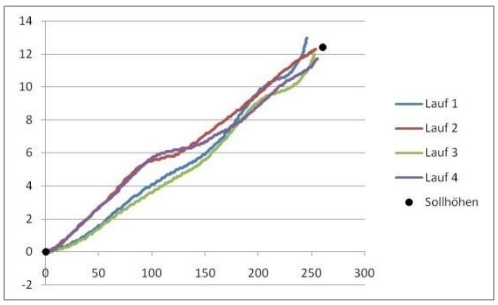


Abbildung 178: Teststrecke 4.1 – Vergleich aller Läufe mit relativer Sollhöhe

4.2.6 Zusammenfassung

Der FRWD W600 ist ein Geschwindigkeits- und Distanzmesser, der nicht nur aus einer Uhr besteht, sondern vor allem aus einem separat angebrachten Empfänger, der das eigentliche Messgerät darstellt. Hat man die Steuerung sowie die optischen und akustischen Signale des Rekorders erst einmal verstanden, ist die Bedienung denkbar einfach. Notfalls räumt die Anleitung, die leider nur auf CD vorliegt, alle Fragen aus. So kann das ganze Set über nur drei Tasten gesteuert werden. Leider gibt es dabei auch keine Möglichkeit die Anzeige der Uhr anzupassen. Hier können immer nur zwei Messwerte gleichzeitig angezeigt werden. Der Stromverbrauch ist gering, außerdem können neben den dafür vorgesehenen Akkus auch normale AAA-Batterien verwendet werden. Besonders vorteilhaft ist auch die große Speicherkapazität, die es erlaubt bis zu 60 Stunden Daten aufzuzeichnen. Die mitgelieferte Software ist sehr übersichtlich und besonders anschaulich gestaltet. Die Übertragung zu einem PC/Laptop über Funk-USB-Dongle kann teilweise etwas länger dauern. Einstellungen des Empfängers sind auch nur von der Software aus möglich. Diese bietet weiterhin einige Auswertemöglichkeiten und Analysefunktionen.

Die aufgezeichneten Strecken treffen eigentlich nur bei optimalen Bedingungen den wahren Streckenverlauf und die Genauigkeit liegt selten bei > 99 %. Während Abschattungen durch Bäume dazu führen, dass die aufgezeichneten Tracks meist nur parallel zur Sollstrecke verschoben sind, kommt es bei Abschattungen durch Gebäude zu sehr großen Schwankungen und dadurch auch zu hohen Unsicherheiten. Mögliche Ursache könnten hier auch Mehrwegeffekte (Multipath) sein. Doch auch bei guten Bedingungen kommt es zu verschiedenen unerklärlichen Fehlmessungen oder unterschiedlichem Verhalten bei gleichen Bedingungen und gleichen Teststrecken. Dies betrifft meist eine fehlerhafte absolute Positionierung schon zu Beginn der Aufzeichnung. Komplette Signalabbrüche oder längere Unterbrechungen wirken sich unterschiedlich aus, was auch wieder hauptsächlich von den äußeren Bedingungen vor/nach der Signalunterbrechung abhängt. Auffällig war auch die Vorausberechnung der einzelnen Werte für die Anzeige. Kommt es bei guten Bedingungen nur zu Aufrundungseffekten, so entsteht bei eingeschränkten Sichten sofort eine Differenz zwischen Aufzeichnung und Anzeige von > 10 m. Betrachtet man das Kurvenverhalten des W600, so fällt hier sofort die starke Glättung ins Auge. Dabei kommt es sowohl zu „Drifts“ als auch zu „Schnitten“. Aber auch die zwischenzeitlich offensichtlich größeren Positionssprünge werden im aufgezeichneten Track durch den Glättungsfilter abgeschwächt. Insgesamt haben aber weder die dadurch entstehenden „Wellen“ im Streckenverlauf noch die Kurven einen Einfluss auf die Streckengenauigkeit. Die Geschwindigkeiten und, wenn überhaupt, im geringen Maße auch die Höhen werden ebenfalls gefiltert. Bei der Höhenmessung fallen der stabile Verlauf der Profile sowie die sehr hohe relative Höhengenauigkeit, die meist weit unter 1 m liegt, auf. Einziger Unsicherheitsfaktor ist hier die per GPS ermittelte absolute Anfangshöhe, die auch bei optimalen Bedingungen sehr stark variiert.

4.2 FRWD W600

4.3 Casio GPR 100

Hersteller:	CASIO
Bezeichnung/Modell:	GPR 100
Eingesetzte(s) Messverfahren:	GPS
Funktionen:	Distanz, Geschwindigkeit, Uhrzeit, Stoppuhr, Datum, Weltzeit (UTC), Timer, Wecker
Maße (BxHxT):	49 x 72 x 17 mm
Gewicht:	62 g
Lieferumfang:	Casio GPR 100, Uhrenständer, Ladegerät, Netzadapter, Kurzanleitung (5-sprachig), Handbuch (5-sprachig)
Akkulaufzeit:	bis zu 2 Std.
Preis:	ca. 499.- €

4.3.1 Gerätebeschreibung

Die CASIO GPR 100 ist eine Freizeituhr mit Geschwindigkeits- und Entfernungsmessung, wobei für letzteres das GPS-System genutzt wird. Außerdem steht eine Vielzahl an Funktionen zur Verfügung, wie zum Beispiel Stoppuhr, automatische Uhrzeitkalibrierung mit Hilfe von GPS, unterschiedliche Timer-Arten, die Anzeige der Weltzeit, automatische Displaybeleuchtung, den Führungsmodus zur Navigation zu gewünschten Punkten aber auch die Speicherung und Verwaltung von bis zu 50 Datensätzen. Es besteht jedoch keine Möglichkeit gespeicherte Daten an einen PC/Laptop zu übertragen. Die Stromversorgung wird durch eine Lithium-Ionen-Akkuzelle sichergestellt, die laut Hersteller für einen Betrieb von bis zu 2 Stunden im „normalen“ Messmodus und bis zu 4,3 Stunden im „Low-Power“-GPS-Modus mit verminderter Präzision ausgelegt ist. Zum Laden des Akkus wird das mitgelieferte Ladegerät genutzt, in das die komplette Uhr eingesetzt wird. Möglich ist nun der Anschluss des im Lieferumfang enthaltenen

Netzadapters, mit einer Kabellänge von ca. 1,90 m, oder die Nutzung einer Alkaliblockbatterie um das Ladegerät selbst mit Energie zu versorgen. Die GPR 100 besitzt ein Monochrom-Display (ca. 22 x 16 mm), das verschiedenste Werte anzeigen kann. Die Gerätefirmware bietet folgende Menüs: Das Hauptmenü (mit Datum, Uhrzeit und Standardsymbolen für den Satellitenempfang) sowie Stoppuhr-, Führungs-, Speicherverwaltungs-, Timer-, Alarm- und Weltzeitmenü. Nachdem die Initialisierung nach einer durchschnittlichen Dauer von 110 Sekunden abgeschlossen ist, kann eine Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung gestartet werden. Casio gibt eine übliche Initialisierungszeit von 1 bis 2 Minuten an, die während der Tests an verschiedenen Standorten einige Male überschritten wurde.

Eingesetztes Messverfahren der GPR 100 ist die GPS-Positionierung bzw. Navigation. Das Herzstück der eingebauten Kombination aus GPS-Antenne und Empfänger ist der verwendete uNav-Chipsatz. Dieser zeichnet sich nicht nur durch seine sehr geringe Größe, sondern vor allem durch die hohe Empfangsempfindlichkeit von -150 dBm aus. Über die Verwendung von WAAS-/EGNOS-Korrekturdaten lässt sich keine Aussage treffen, obwohl folgender Satz darauf schließen lassen könnte: „Da diese Uhr auf den Empfang der Funksignale von künstlichen Satelliten bezogen ist, können bestimmte Bedingungen ihren Betrieb beeinträchtigen.“ (Handbuch).

4.3.2 Bedienung

Während die mitgelieferte mehrsprachige Kurzanleitung (25 Seiten, davon 5 in Deutsch) in übersichtlicher Form die Grundlagen der Uhr, die Nutzung des Ladegeräts und die Menüs beschreibt, können alle weiteren Informationen dem Handbuch (350 Seiten, davon 68 in Deutsch) entnommen werden. Dieses ist anschaulich (mit vielen Bildern) und relativ übersichtlich gestaltet. Dank des Inhaltsverzeichnisses zu Beginn des jeweiligen Sprachenteils findet man gesuchte Themen/Begriffe recht schnell. Für die Bedienung der Casio GPR 100 sollte man zumindest die Kurzanleitung gelesen haben, da es sonst schon anfangs zu Schwierigkeiten kommen kann. Einige nicht unwesentliche Tipps erfährt man auch erst aus dem Handbuch. Mit Hilfe dieser Grundinformationen lässt sich die Uhr aber dann leicht über die 5 Steuertasten bedienen, was nach kurzer Zeit sehr gut funktioniert. Allerdings benötigt die GPR 100 für die Initialisierung oft mehr als zwei Minuten, wobei diese bei einem schwachen Zustand der Batterie gar nicht mehr durchgeführt werden kann. Die Menüführung ist relativ unkompliziert und jede Ansicht enthält meist nur zwei verschieden Messdaten. In Abbildung 179 werden Datum und Uhrzeit im Hauptmenü angezeigt.

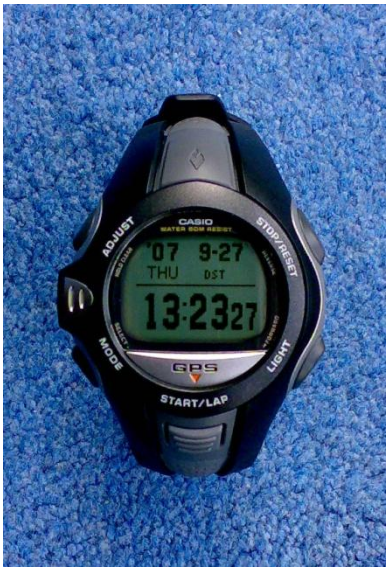


Abbildung 179: Anzeige der GPR 100

Ansonsten bietet die GPR 100 sehr wenige Einstellungsmöglichkeiten. Die Lithium-Ionen-Akkuzelle versorgt das Gerät nur über einen kurzen Zeitraum von maximal 2 Stunden mit Strom und bedarf gleichzeitig einer Ladedauer von ca. 3 Stunden. Zum Laden wird die Uhr in das mitgelieferte Ladegerät eingelegt. Dies erweist sich teilweise als aufwendig, da die Uhr in eine bestimmte Stellung gebracht werden muss. Besonders praktisch ist die Möglichkeit, eine Blockbatterie zum Betrieb des Ladegeräts einzusetzen, da die Akkuzelle so auch unterwegs geladen werden kann. Der größte Nachteil bei der Nutzung der Casio GPR 100 zu Trainingszwecken ist jedoch die fehlende Datenübertragungsfunktion. Der Nutzer ist somit nicht in der Lage, Tracks oder andere Trainingsdaten abzurufen und auszuwerten. Es ist hingegen aber möglich bis zu 50 Datensätze auf der Uhr zu speichern, die Werte wie Datum, Uhrzeit, Distanz usw. enthalten. Die registrierten Daten lassen sich anschließend jederzeit einsehen oder löschen.

4.3.3 Tragekomfort

Die Casio GPR 100 wiegt nur 62 g und ist angenehm zu tragen. Sie fällt dabei weniger durch ihre Größe als durch das sportliche Design auf.

4.3.4 Messprinzip GPS

Für die Untersuchung der Genauigkeit der Geschwindigkeits- und Distanzmessung der Casio GPR 100 wurden einige Tests durchgeführt. Da sich die Geschwindigkeiten aus den gemessenen Entfernungen berechnen lassen und die Uhr keine Möglichkeit der Aufzeichnung und späteren Auswertung der einzelnen Geschwindigkeitswerte über die Zeit besitzt, werden im Wesentlichen erst einmal die angezeigten Strecken analysiert. Der Nachteil dabei ist, dass die Distanz nur auf volle 10 m abgelesen werden kann. Eine Betrachtung der gespeicherten Messwerte im internen Gerätespeicher ist nicht notwendig, da die Angaben den notierten und damit angezeigten Werten entsprechen.

Teststrecke 1.0 (optimale Bedingungen)

Zunächst wurde das Gerät unter optimalen Bedingungen auf der Referenzstrecke (siehe Teststrecke 1.0) getestet. Die angezeigten Werte können dem Diagramm in Abbildung 180 entnommen werden. Daraus resultieren ein Mittelwert von 522,50 m und eine Standardabweichung von 19,20 m. Die Streckengenauigkeit liegt bei > 90,9 %, was sich schon unter optimalen Bedingungen weit unter der erwarteten Genauigkeit von > 99 % befindet. Bei einer Marathonstrecke mit 42 km Länge ist so eine Unsicherheit von bis zu 4 km möglich. Auffällig ist auch, dass alle Strecken eher zu lang angezeigt werden.

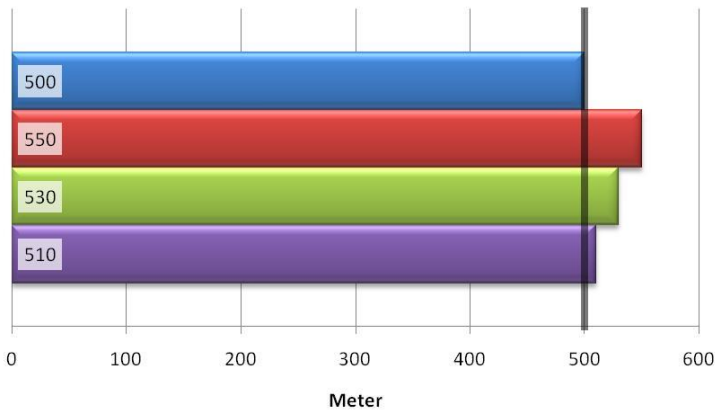


Abbildung 180: Teststrecke 1.0 - Angezeigte Strecken (Sollstrecke 500 m)

Teststrecke 2.0/2.1 (eingeschränkte Sicht durch Gebäude oder Bäume)

Teststrecke 2.0 und 2.1 zeichnen sich durch eingeschränkte Sichten aus. Im ersten Fall werden diese durch Gebäude verursacht, die zu jeder Zeit auf mindestens einer Seite des Kurses für Abschattungen sorgen. Im zweiten Fall kommt es zu einer dauerhaften Einschränkung der Sicht durch direkt an die Strecke angrenzende Bäume. Verglichen mit der Referenzstrecke kommt es aber weder zu einer Genauigkeitssteigerung noch zu einem Genauigkeitsverlust (siehe Abbildung 181 und Abbildung 182). In allen Fällen kommt es zu Entfernungen, die entweder der Sollstrecke entsprechen oder größer als diese sind. Die Streckengenauigkeit liegt dabei nur bei > 88,6 %.

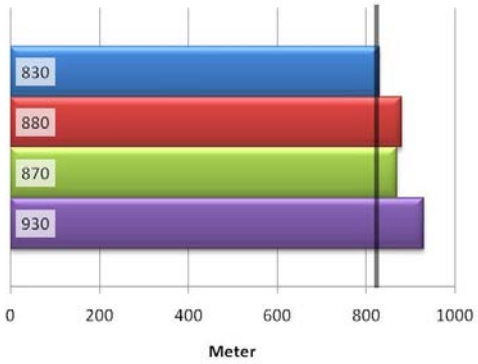


Abbildung 181: Teststrecke 2.0 – angezeigte Strecken

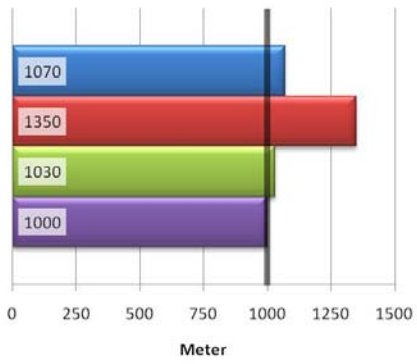


Abbildung 182: Teststrecke 2.1 – angezeigte Strecken

Teststrecke 3.0 (stark eingeschränkte Sicht durch Wald)

Auf Teststrecke 3.0 (Wald) werden die Strecken hingegen zu kurz gemessen, wie in Abbildung 183 deutlich wird. Kommt es zu Signalunterbrechungen oder einem schwachen Empfang von GPS-Signalen, wird die Streckenberechnung, laut Handbuch, unterbrochen. Erst wenn die Messung wieder möglich ist, wird aus der neu ermittelten und der letzten gespeicherten Koordinate vor Signalunterbrechung die Strecke berechnet. Dadurch kann es dazu kommen, dass eine kürzere Verbindung zur Berechnung verwendet wird als die, die tatsächlich zurückgelegt wurde. In diesem Fall kommt es vermutlich zum Ende der Strecke zu wiederholten Signalausfällen, wodurch Teile der Strecke nicht mit in die Berechnung der Gesamtentfernung einfließen.

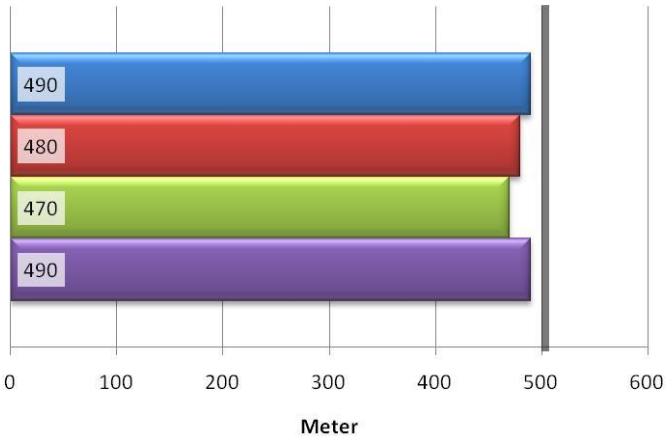


Abbildung 183: Teststrecke 3.0 – angezeigte Strecken

Teststrecke 8.0 (kurviger Streckenverlauf)

Für die Untersuchung des Kurvenverhaltens und des Einflusses von Richtungsänderungen auf die Genauigkeit wurde Teststrecke 8.0 genutzt. Bis auf eine Ausnahme in Abbildung 184 ergeben sich so Distanzen, die über die 1081 m (Sollstrecke) hinausgehen. Ein vorstellbarer Grund dafür wäre eine Vorausberechnung der Positionen bei Bewegung ohne anschließende Filterung der Werte, so dass es in Kurven zu „Drifts“ kommen würde. Dadurch wird der Radius der Kurve künstlich vergrößert. Aufgrund der statischen Berechnung der Distanz aus Koordinaten werden so scheinbar größere Wege zurückgelegt. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass Werte durch die GPR 100 prädiziert werden, da das Verhalten bei Unterbrechung der Messung sonst nicht zu erklären wäre. Die fehlerhaft bestimmten Entfernungen, und die damit verbundene Verlängerung des zurückgelegten Wegs, sind Unsicherheiten bei der Bestimmung der Koordinaten und den so entstehenden Querabweichungen, zuzuordnen. Lauf 4 weist eine zu kurz gemessene Strecke auf, die höchstwahrscheinlich einer oder mehreren Signalunterbrechungen in Kurven zuzuschreiben ist. Dadurch werden Distanzen über die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten berechnet.

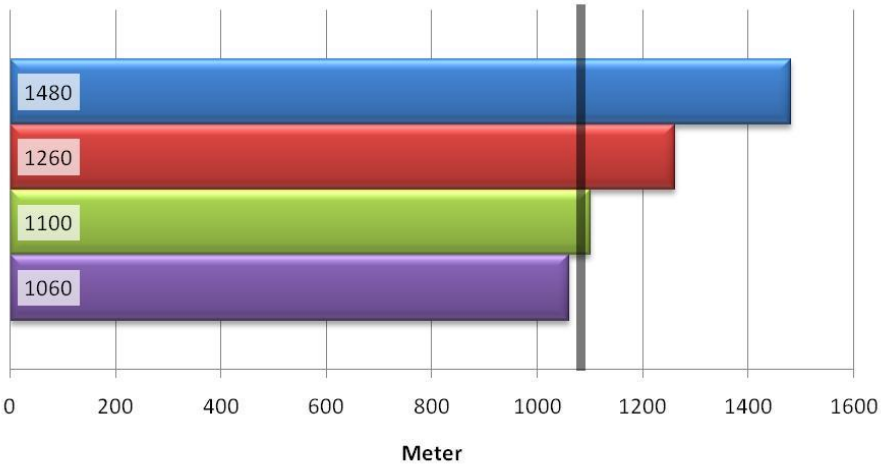


Abbildung 184: Teststrecke 8.0 – angezeigte Strecken

Teststrecke 9.0/9.1 (Signalunterbrechung/-abbruch)

Auf den Teststrecken 9.0 und 9.1 sollte die Genauigkeit bei Signalabbruch bzw. Signalunterbrechung untersucht werden. Dafür wurden zwei verschiedene Brücken gewählt, die für den gewünschten Effekt sorgen sollten (siehe Teststrecken). Die Tests werden in zwei Arten unterteilt: Der Brücken- bzw. Tunneldurchlauf zur Simulation einer kurzzeitigen Signalunterbrechung und das Anhalten unter der jeweiligen Brückenmitte um einen Signalabbruch zu erzeugen. Bei letzterem ging es darum, das weitere Verhalten der Geräte innerhalb von 30 Sekunden nach diesem Signalabbruch zu analysieren.

Auf Teststrecke 9.0 scheint die vorübergehende Signalunterbrechung keinen großen Einfluss auf die Genauigkeit zu haben, wie man Abbildung 185 entnehmen kann. Da sich die Sollstrecke auf 324 m beläuft, können bei den letzten beiden Läufen auch Rundungseffekte für die nur 4 m zu kurz gemessenen Distanzen verantwortlich sein. Beim zweiten Lauf kommt es höchstwahrscheinlich zu einer größeren Querabweichung vor bzw. kurz nach Unterbrechung der Messung, so dass diese Entfernung zu lang bemessen wird.

Die angezeigten Strecken in Abbildung 186 (Teststrecke 9.1) zeigen eine erstaunlich hohe Genauigkeit. Alle Werte liegen sehr nah an dem Sollwert von 277 m, was durch die optimalen Bedingungen vor und nach der Unterführung und den geradlinigen Verlauf der Strecke zu begründen ist. Kommt es nur zu Abweichungen in Laufrichtung oder zu einem kurzzeitigen Signalausfall, wird so kein Teil des zurückgelegten Weges bei der Berechnung unterschlagen.

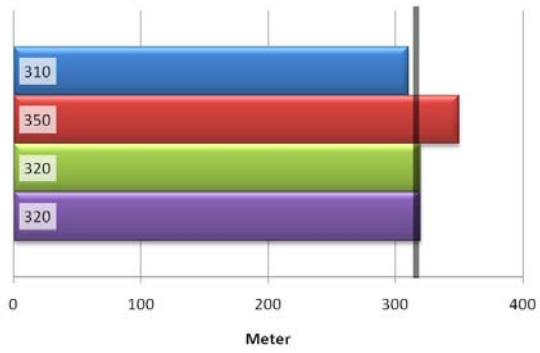


Abbildung 185: Teststrecke 9.0 – angezeigte Strecken (Durchlauf)

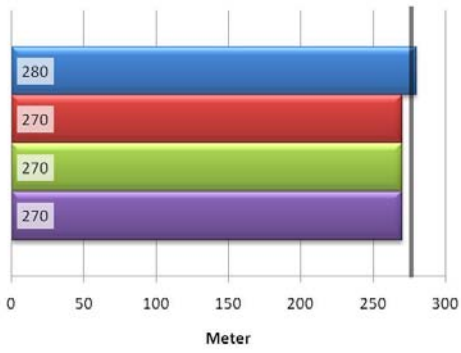


Abbildung 186: Teststrecke 9.1 – angezeigte Strecken (Durchlauf)

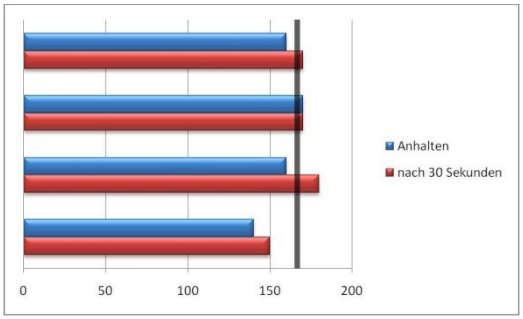


Abbildung 187: Teststrecke 9.0 – angezeigte Strecken

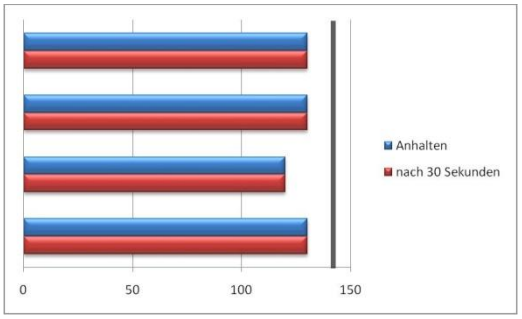


Abbildung 188: Teststrecke 9.1 – angezeigte Strecken

Abbildung 187 und Abbildung 188 zeigen das Verhalten der Casio GPR 100 nach dem abrupten Anhalten in Brückenmitte. Wie zuvor schon beschrieben, werden bei Signalunterbrechung keine weiteren Berechnungen durchgeführt bis eine Positionierung wieder möglich ist. Während dies bei der 35 m breiten Brücke des Messeschnellwegs zutrifft, scheint der Empfänger der GPR 100 auf Teststrecke 9.0 unter dem nur 15 m breiten Fußgängerüberweg noch Signale zu empfangen und so weitere Distanzen zu berechnen.

Teststrecke 10.0 (plötzliches Anhalten)

Teststrecke 10.0 soll das Verhalten von Geschwindigkeits- und Entfernungsmessern bei plötzlichem Anhalten und 30-sekündigem Verweilen auf dem Haltepunkt darlegen. Bei der Casio GPR 100 kommt es während der gesamten Dauer von 30 Sekunden zu keinerlei Differenzen zu dem Wert, der bei Erreichen des Haltepunkts angezeigt wurde (siehe Abbildung 189). Dies verdeutlicht, dass es weder zu einer verspäteten Weitergabe der Werte an die Ausgabeschnittstelle noch zu einer Verzögerung durch Berechnungszeiten kommt. Die wichtigste Erkenntnis ist allerdings, dass die GPR 100 keine Positionen im Voraus berechnet, da es sonst zumindest während der ersten Sekunden noch zu Geschwindigkeits- oder Entfernungsschwankungen gekommen wäre.

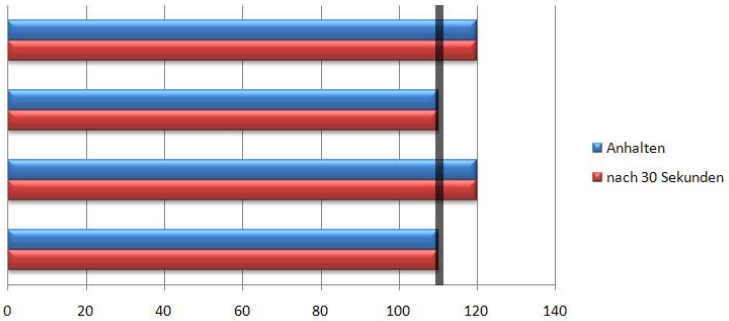


Abbildung 189: Teststrecke 10.0 – angezeigte Strecken

4.3.5 Zusammenfassung

Die Casio GPR 100 ist eine Freizeituhr mit erweiterten Funktionen. Sie fällt durch ihr sportliches Design, das geringe Gewicht und den hohen Tragekomfort auf. Die Bedienung ist nach einer kurzen Eingewöhnungsphase sehr leicht und direkt vergleichbar mit anderen digitalen Armbanduhren. Die Bedienungsanleitung schreckt mit ihren 350 Seiten zunächst etwas ab, zeigt sich dann aber gut strukturiert und anschaulich. Das Display ist übersichtlich und auch die Menüs sind gut eingeteilt. Diese sind jedoch statisch festgelegt, wodurch die Anzeige nicht manuell angepasst werden kann. Der Stromverbrauch erweist sich im eingeschalteten Messmodus als sehr hoch. Das Ladegerät ist mit seinem optionalen Batteriebetrieb sehr praktisch und vor allem auch unterwegs einsetzbar. Leider gibt es für die Daten keine Übertragungsmöglichkeit auf PC/Laptop und damit auch keine Analysesoftware. Auffällig sind vor allem die langen Initialisierungszeiten und die häufigen Unterbrechungen der Messung.

Die Streckengenauigkeiten liegen nur sehr selten bei > 99 %. Selbst bei optimalen Bedingungen kommt es zu sehr hohen Unsicherheiten und stark variierenden Messwerten. Eingeschränkte Sichten führen nicht zwangsläufig zu schlechteren Genauigkeiten. Die Funktionsweise der Uhr wird erst im Wald deutlich: Kommt es zu einer Signalunterbrechung oder kann die GPR 100 nur schwache Signale empfangen, wird die Streckenberechnung zunächst abgebrochen und erst dann weitergeführt, wenn eine Messung wieder möglich ist. Die Distanz zwischen zuletzt gemessener und neu ermittelter Koordinate wird daraufhin auf die Gesamtstrecke aufaddiert. Dies lässt sich auch bei einem kompletten Signalabbruch unter einer Brücke erkennen, da es hier zu keiner Beeinträchtigung der zurückgelegten Entfernung kommt. Die Berechnung erfolgt streng statisch: Es werden weder Werte vorausberechnet noch gefiltert. Die Strecke ergibt sich also aus sämtlichen gemessenen, ungefilterten Koordinaten, was zu hohen Unsicherheiten führt. Im Handbuch steht dazu Folgendes: „…Messwerte sind nur als ungefähre Annäherungswerte zu verstehen…“. Schwierigkeiten bei der genauen Positionierung ergeben sich vermutlich durch die Anbringung der Uhr am Handgelenk und so durch die Bewegungen des Arms während der Messung sowie durch die Abschattungen, für die der Nutzer selbst verantwortlich ist. Außerdem besitzt die Antenne eine sehr geringe Größe und ist zudem während des Trainings oft seitlich ausgerichtet.

4.4 Garmin Forerunner 305

Hersteller:	GARMIN
Bezeichnung/Modell:	Forerunner 305
Eingesetzte(s) Messverfahren:	GPS
Funktionen:	Datum, Distanz, Geschwindigkeit, Höhe, verbrauchte Kalorien, Neigung, Herzfrequenz, Steuerkurs, Uhrzeit, Stoppuhr
Maße (BxHxT):	54 x 68 x 20 mm
Gewicht:	75 g
Lieferumfang:	Forerunner 305, USB-Übertragungskabel, Dockingstation, Steckdosenadapter (für UK), Pulsmesser (Brustgurt), Armbandverlängerung und Montagewerkzeug, Ladegerät, Kurzanleitung (Deutsch, Englisch), Handbuch (Deutsch, Englisch), Software CD („Garmin Training Center“)
Akkulaufzeit:	bis zu 10 Std.
Preis:	ca. 348.- €

4.4.1 Gerätebeschreibung

Der GARMIN Forerunner 305 ist ein Geschwindigkeits- und Distanzmesser, der ausschließlich das GPS-System zum Aufzeichnen der Tracks und zur Berechnung und Anzeige der Distanzen und Geschwindigkeiten nutzt. Er wird mit separatem Herzfrequenzmesser in Form eines Brustgurts geliefert. Optional wäre noch die Verwendung des GSC 10 Geschwindigkeits- und Trittfrequenzsensors, der hauptsächlich in Verbindung mit dem Fahrradcomputer Garmin Edge 305 verkauft wird. Die Stromversorgung des Forerunners wird durch einen Lithium-Ionen-Akku sichergestellt, der laut Hersteller für bis zu 10 Stunden Betrieb ausgelegt ist. Zum Laden des Akkus wird

die Dockingstation mit Mini-USB-Schnittstelle verwendet. Dadurch kann das Gerät nicht nur durch Nutzung des mitgelieferten Ladegeräts (Kabellänge: ca. 1,90 m), sondern auch durch Anschluss an einen PC/Laptop mittels USB-Übertragungskabel (ca. 1,10 m) geladen werden. Der Forerunner besitzt ein Monochrom-Display (ca. 33 x 21 mm), das neben Standardsymbolen für Batteriezustand, Satelliten-, Pulsmesser- und Trittfrequenzmesserempfang verschiedenste Messwerte (oder aus diesen berechnete Werte) anzeigen kann. Die Gerätefirmware bietet mehrere Menüs, die folgende Informationen enthalten: Nach dem Einschalten des Forerunners erscheint direkt auf den Startbildschirm folgend ein Ladebalken, der den Stand der Initialisierung visualisiert. Nach einer durchschnittlichen Initialisierungszeit von 46 Sekunden sind die Mehrdeutigkeiten gelöst. Garmin legt eine Grenze bei maximal 44 Sekunden (Kaltstart) fest, die während der Tests an verschiedenen Standorten jedoch einige Male überschritten wurde. Daraufhin wechselt die Anzeige direkt in das Hauptmenü, wo eine Anzahl von 1 bis 4 verschiedenen Messgrößen und berechneten Werten (z.B. verschiedene Durchschnittswerte) pro Seite (insgesamt drei Datenseiten) dargestellt werden kann. Für die angezeigten Werte besteht eine Aktualisierungsrate von 1 Sekunde. Eine weitere mögliche Ansicht ist die Betrachtung der zurückgelegten Strecke in verschiedenen Maßstäben. Zuletzt können im Optionsmenü noch diverse Einstellungen vorgenommen werden. Dazu gehören die Verwaltung der aufgezeichneten Protokolle, verschiedene Trainingseinstellungen (AutoPause, Alarme, Virtual Partner, usw.), Navigationsoptionen (Speichern und Aufsuchen von Wegpunkten, Verwaltung von Routen und Ansicht eines Satelliten-Skyplots) und allgemeine Einstellungen für das jeweils gewählte Sportartenprofil (Anzeigeeinstellungen, Eingabe des Nutzerprofils, Auswahl der Einheiten, Zeiteinstellungen, usw.). Hier lässt sich auch die Datenaufzeichnung konfigurieren. Wird ein Aufzeichnungsintervall von 1 Sekunde gewählt, so kann der interne Flash-Speicher nur bis zu 3,5 Stunden beschrieben werden. Ist der Speicher voll, werden existierende Daten überschrieben. Abhilfe schafft hier die Möglichkeit der intelligenten Aufzeichnung, bei der nur „wichtige“ Punkte gespeichert werden, wodurch sich die Datenmenge abhängig von der zurückgelegten Strecke reduziert. Mit Hilfe des Datenkabels und der mitgelieferten Software (und Treiber) „Garmin Training Center“ können Trainings bzw. Tracks von Forerunner zu PC/Laptop, aber auch umgekehrt, übertragen werden.

Das eingesetzte Messverfahren des Forerunner 305 ist die GPS-Positionierung bzw. Navigation. Das Herzstück der eingebauten Kombination aus GPS-Antenne und Empfänger ist der verwendete SiRF SiRFstarIII Chipsatz. Dieser zeichnet sich nicht nur durch seine sehr geringe Größe, sondern vor allem durch die hohe Empfangsempfindlichkeit von -159dBm und die große Anzahl an simultan agierenden Korrelatoren aus. Außerdem können zur Steigerung der Genauigkeit WAAS-/EGNOS-Korrekturdaten empfangen werden.

4.4.2 Bedienung

Während die mitgelieferte Kurzanleitung (7 Seiten) Grundlagen wie Tastenbelegung, Einrichtung des Benutzerprofils, Laden des Akkus und Anbringung des Pulsmessers beschreibt, dient das Benutzerhandbuch, welches in zwei Sprachen vorliegt, der detailierten Beschreibung des Forerunner 305. Dieses ist sehr anschaulich (mit vielen Bildern) und übersichtlich gestaltet. Durch das Inhaltsverzeichnis am Anfang oder das Schlagwortverzeichnis am Ende der Bedienungsanleitung werden gesuchte Themen/Begriffe sehr schnell gefunden. Für die Bedienung des Edge 305 ist es aber nicht unbedingt erforderlich die Anleitung komplett durchgelesen zu haben. Das Gerät lässt sich fast intuitiv durch Nutzung der 7 Steuertasten, die durch ihre Beschriftung bereits eindeutig zugeordnet werden können, bedienen. Die Menüführung ist leicht verständlich und übersichtlich gestaltet (Abbildung 190). Je nach Wunsch besteht im Hauptmenü die Möglichkeit, einen, zwei, drei oder vier Werte anzuzeigen. Diese „Datenfelder“ können daraufhin zusätzlich nach Belieben mit dem gewünschten Messwert belegt werden. In Abbildung 190 werden beispielsweise Zeit (Stoppuhr), Geschwindigkeit, Distanz und Uhrzeit angezeigt. Einzig und allein die Karte mit der zurückgelegten Strecke ist nicht sonderlich übersichtlich. Hier befindet sich weder eine Straßenkarte im Hintergrund noch kann man diese verschieben. Wird eine längere Distanz zurückgelegt, kann dieser Teil nur durch eine Änderung des Maßstabs überhaupt betrachtet werden, was eine dementsprechend schlechte Auflösung dieses Teilstücks zur Folge hat. Der Lithium-Ionen-Akku versorgt den Forerunner 305 über einen großen Zeitraum mit Strom und bedarf gleichzeitig einer sehr geringen Ladedauer. Die Dockingstation bzw. Ladeschale mit Mini-USB-Anschluss ist ebenso einfach zu bedienen wie das Ladegerät. Der Pulsmesser wird mit einer Knopfbatterie (angegebene Lebensdauer etwa 3 Jahre) geliefert. Es treten keinerlei Probleme bei der Benutzung/Anbringung des Brustgurts auf. Ist der Pulsmesser umgelegt, wird dieser entweder automatisch gefunden oder kann über das Einstellungsmenü manuell gesucht werden. Daraufhin findet eine Übertragung und Aufzeichnung der Werte dieses Sensors statt, solange sich dieser im Umkreis von maximal 3 m um den Forerunner befindet.

Abbildung 190: Anzeige des Forerunner 305

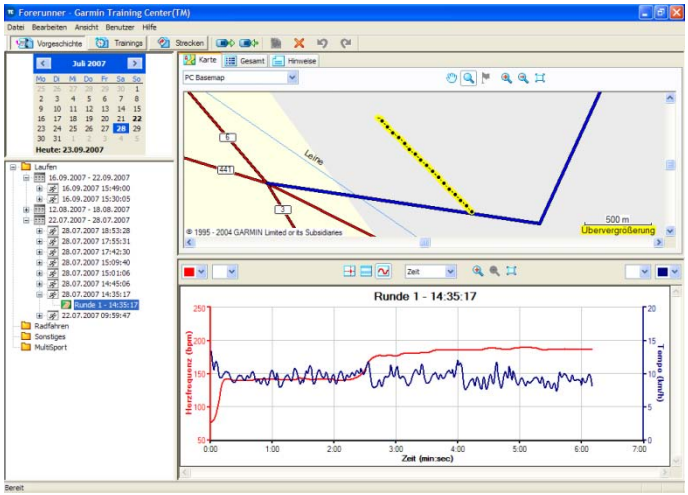


Abbildung 192: Garmin Training Center

Die Installation und Bedienung der mitgelieferten Software „Garmin Training Center“ ist unkompliziert. Wird das Unterprogramm „gstart“ beim Systemstart ausgeführt, wird der Anschluss des Edge automatisch erkannt und die Software gestartet. Der Anschluss des Geräts an einen PC/Laptop erfolgt mittels USB-Datenkabel. Mit wenigen Klicks werden anschließend die aufgezeichneten Strecken, Wegpunkte, usw. übertragen. Wie in Abbildung 192 ersichtlich wird, können hier in übersichtlicher Form Trainings aufgerufen und nach Datum sortiert werden. Außerdem wird der aufgezeichnete Track dargestellt, wobei Auflösung und Inhalt (Details) der Karte eher unbefriedigend sind. Abhilfe schafft kostenpflichtiges Kartenmaterial, was hier nicht weiter untersucht werden soll. Insgesamt enthält die Software aber nur wenige Einstellungsmöglichkeiten.

4.4.3 Tragekomfort

Das Gesamtgewicht der einzelnen Komponenten beträgt gerade einmal 149 g, wobei der Forerunner selbst mit 75 g sogar weniger wiegt als vom Hersteller angegeben (ca. 77 g). Das Gerät liegt gut am Arm und ist nicht zu schwer. Um das Display abzulesen, muss man den Arm etwas mehr zu sich drehen als dies bei einer normalen Armbanduhr der Fall ist, was jedoch nicht wirklich als störend beschrieben werden kann. Während die Uhr für Unterarme mit geringem Umfang etwas sehr groß wirkt, besteht die Möglichkeit für Unterarme mit großem Umfang einen Teil des Armbands durch die mitgelieferte Armbandverlängerung zu ersetzen und so ein 2 cm längeres Band zu erhalten. Insgesamt ist der Forerunner 305 sehr bequem zu tragen und kann unter Umständen auch zeitweise eine normale Armbanduhr ersetzen ohne dabei störend zu wirken. Der Pulsmesser (74 g) liegt mit seinem verstellbaren und elastischen Band gut an der Brust an (Umfang von ca. 63 – 86 cm).

4.4.4 Messprinzip GPS

Teststrecke 1.0 (optimale Bedingungen)

Für die Untersuchung der Genauigkeit der Distanz- und Geschwindigkeitsmessung des Garmin Forerunner 305 wurde dieser zunächst auf der Referenzstrecke (siehe Teststrecke 1.0) unter optimalen Bedingungen getestet. Dabei wurden folgende Distanzen gemessen:

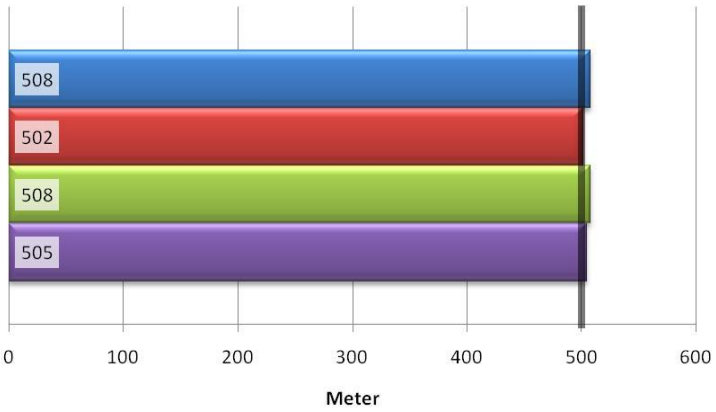


Abbildung 193: Teststrecke 1.0 - Angezeigte Strecken (Sollstrecke 500 m)

Aus den Werten in Abbildung 193 resultieren ein Mittelwert von 505,75 m und eine Standardabweichung von 2,49 m. Als streckenabhängige Genauigkeit kann dementsprechend ein Wert von mindestens 98,4 % erreicht werden. Garmin gibt eine GPS-Geschwindigkeitsgenauigkeit von < 0,05 m/s bei optimalen Bedingungen an. Dies macht umgerechnet eine Streckengenauigkeit von > 98,2 % aus. Bei 500 m wären also beispielsweise 509 m gerade noch im angegebenen Genauigkeitsbereich. Da es sich in dieser Größenordnung noch um eine kurze Strecke handelt, sollten relative GPS-Messungen auch ohne Korrekturdaten noch streckenabhängige Genauigkeiten von > 99 % erreichen, was bei zwei der vier Läufe auch der Fall ist.

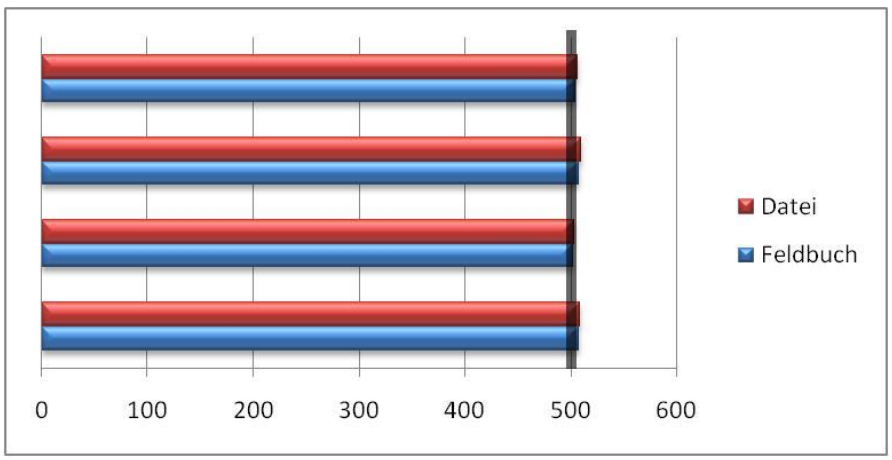


Abbildung 194: Teststrecke 1.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Auffällig waren auch Unterschiede zwischen angezeigten und aufgezeichneten Werten (siehe Abbildung 194). Die Abweichungen betragen in diesem Fall maximal 2 m, wobei einiges dafür spricht, dass die gemessenen bzw. berechneten Werte einfach nur leicht zeitverzögert an das Display weitergeleitet oder nicht schnell genug berechnet werden können.

Image © 2007 AeroWest
© 2007 Europa Technologies
Google
Zeiger 32 U 557316.53 m O 5796767.18 m N Höhe 82 m
Übertragung 100%
Sichthöhe 348 m

Abbildung 195: Teststrecke 1.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Die aufgezeichneten Tracks haben nur sehr geringe Querabweichungen zu der präzise eingemessenen Sollstrecke, wie hier in Abbildung 195 zu sehen ist.

Image © 2007 AeroWest
© 2007 Europa Technologies
Google
Zeiger 32 U 557317.22 m O 5796749.83 m N Höhe 82 m
Übertragung 100%
Sichthöhe 295 m

Abbildung 196: Teststrecke 1.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (blau)

Abbildung 196 zeigt jedoch nicht nur die maximale Querabweichungen aller Läufe von 7,07 m, sondern auch eine konstante parallele Verschiebung des gesamten aufgezeichneten Tracks in östliche Richtung. Anzumerken ist, dass derartige Verschiebungen nur bei Läufen in südliche Richtung auftreten. Bei einer Süd-Nord-Bewegungsrichtung kommt es nur zu sehr geringen Querabweichungen bis maximal 3,13 m (siehe Abbildung 195), wobei selbst das eher den Ausnahmefall darstellt. Die Ursache ist schwer zu benennen, da die Antenne des Forerunners durch die natürliche Haltung und Bewegung des Arms normalerweise nach oben ausgerichtet ist. Der Läufer selbst schirmt den Empfang in Laufrichtung nach hinten ab. Da sich eine größere Anzahl der GPS-Satelliten und die geostationären EGNOS-Satelliten im Süden befinden, müssten solche Unsicherheiten prinzipiell eher bei Läufen in nördliche Richtung auftreten.

Bei der Durchführung der Test wurde auf eine möglichst gleichmäßige Geschwindigkeit geachtet. In Abbildung 197 zeigt sich so ein typischer Geschwindigkeitsverlauf über die Strecke. Hierbei kommt es zu Geschwindigkeitsvariationen bis $\pm$ 2 km/h. Betrachtet man die mittlere Sollgeschwindigkeit und die mittlere Ist-Geschwindigkeit, so erkennt man, dass diese sehr nahe beieinander liegen. Die Differenz beträgt 0,11 km/h, wobei sich die Sollgeschwindigkeit auf die Sollstrecke dividiert durch die tatsächlich verstrichene Zeit bezieht. Es ist nun allerdings schwer eine Erklärung für die Abweichungen zu finden, da der Forerunner 305, im Gegensatz zur Anzeige in Echtzeit (eine Nachkommastelle), bis auf wenige Ausnahmen nur ganzzahlige Geschwindigkeiten aufzeichnet. Dadurch ergeben sich drei Fehlerquellen: Ein unregelmäßiger Lauf, Rundungsfehler oder Messfehler des Geräts.

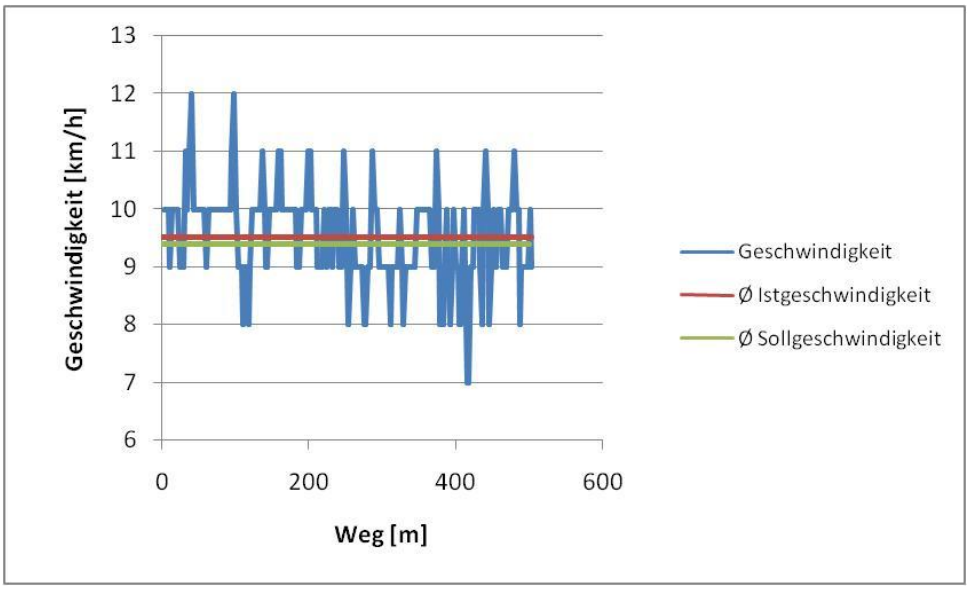


Abbildung 197: Teststrecke 1.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Der Höhenverlauf in Abbildung 198 zeigt einen Höhenunterschied von 8 m (tatsächlicher Höhenunterschied 1,17 m), wodurch deutlich wird, dass die Höhenkomponente bei GPS-Messungen am unsichersten ermittelt werden kann. Außerdem muss man dazu sagen, dass der Forerunner 305 nur ganze Höhenwerte anzeigt und aufzeichnet.

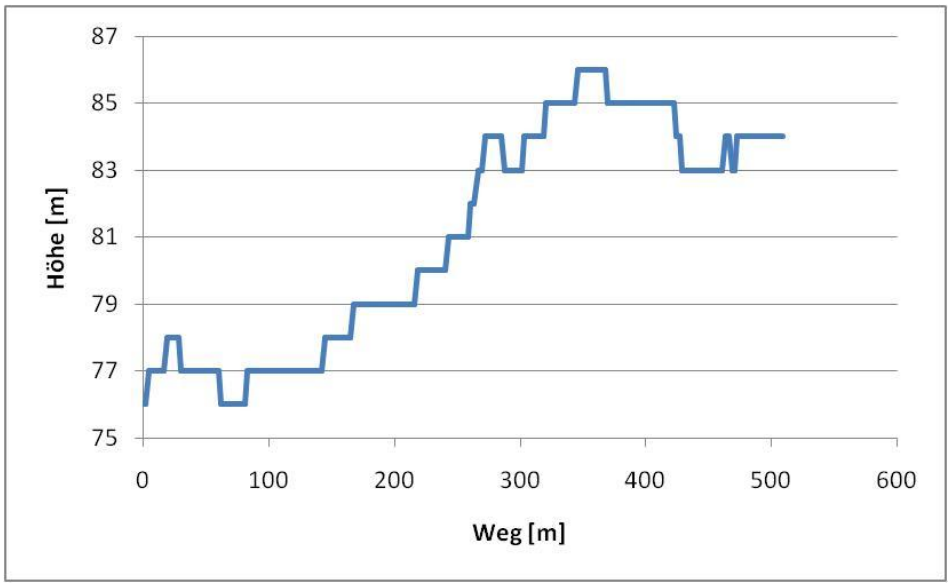


Abbildung 198: Teststrecke 1.0 – Höhenverlauf

Teststrecke 2.0 (eingeschränkte Sicht durch Gebäude)

Anschließend wurden die Geräte auf Teststrecke 2.0 unter eingeschränkter Sicht durch Gebäude, und somit unter verschlechterten Bedingungen, getestet. In Abbildung 199 sind die Ergebnisse der Läufe aufgelistet. Es ergeben sich ein Mittelwert von 836,20 m (Sollstrecke: 824 m) und eine Standardabweichung von 11,91 m. Bei diesen veränderten Bedingungen wird nur noch eine Streckengenauigkeit von > 93,9 % erreicht. Verglichen mit der Referenz liegen angezeigte und aufgezeichnete Werte bereits bis zu 24 m auseinander (siehe Abbildung 200). Eine mögliche Ursache könnte ein durch den verschlechterten Empfang hervorgerufener erhöhter Rechenaufwand sein, wodurch tatsächliche Werte später an die Anzeigeschnittstelle weitergeleitet werden.

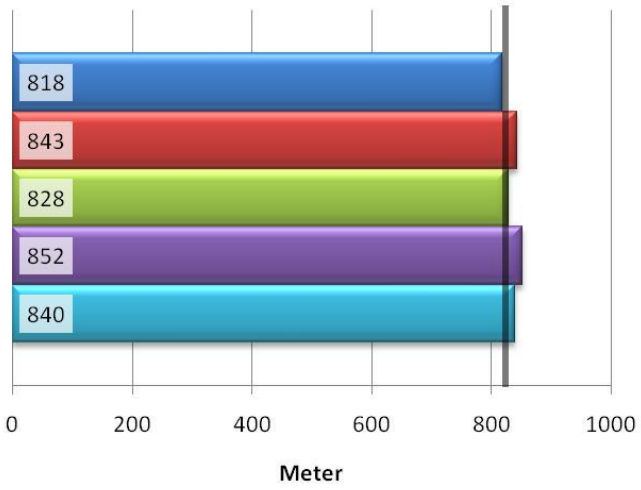


Abbildung 199: Teststrecke 2.0 – Angezeigte Strecken (Sollstrecke 824 m)

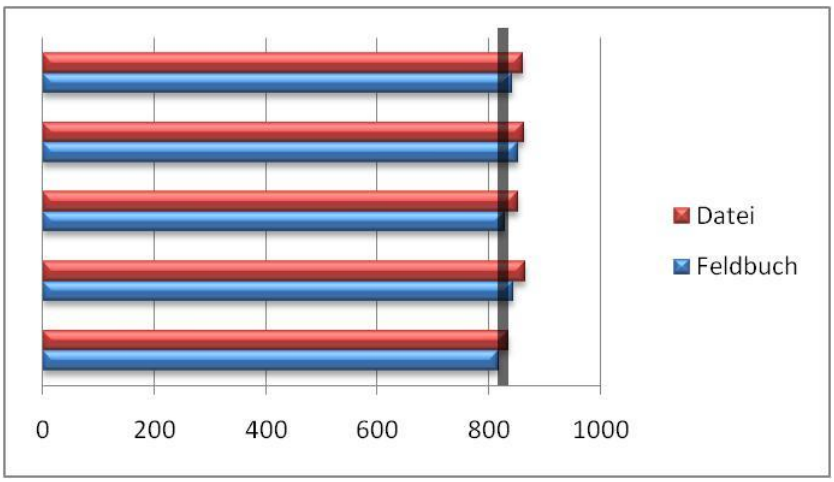


Abbildung 200: Teststrecke 2.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Bei einer Betrachtung der aufgezeichneten Tracks (siehe Abbildung 201) wird deutlich, dass eingeschränkte Sichten, wie erwartet, einen Einfluss auf die Genauigkeit haben. So liegen nun bereits Querabweichungen bis maximal 22,21 m vor. Im nördlichen Teil der Strecke kommt es zu besonders auffälligen Unsicherheiten. Dies ist durch die Konstellation bzw. Anzahl der Satelliten zu erklären: Die Sicht in südliche Richtung ist hier weitestgehend verdeckt. Da sich die GPS-Satelliten, wie bereits erwähnt, auf Umlaufbahnen mit einer Inklination von 55° bewegen, stehen von Deutschland aus gesehen mehr Satelliten im Süden zur Verfügung. Außerdem befinden sich die geostationären EGNOS-Satelliten über Zentralafrika, von wo aus Signale, und damit Korrekturdaten, nur unter einer Elevation von maximal 35° empfangen werden können. Dies erklärt auch die sehr genaue Überlagerung von Sollstrecke und aufgezeichnetem Track im südlichen Teil der Strecke (kaum Abschattungen in Richtung Süden).

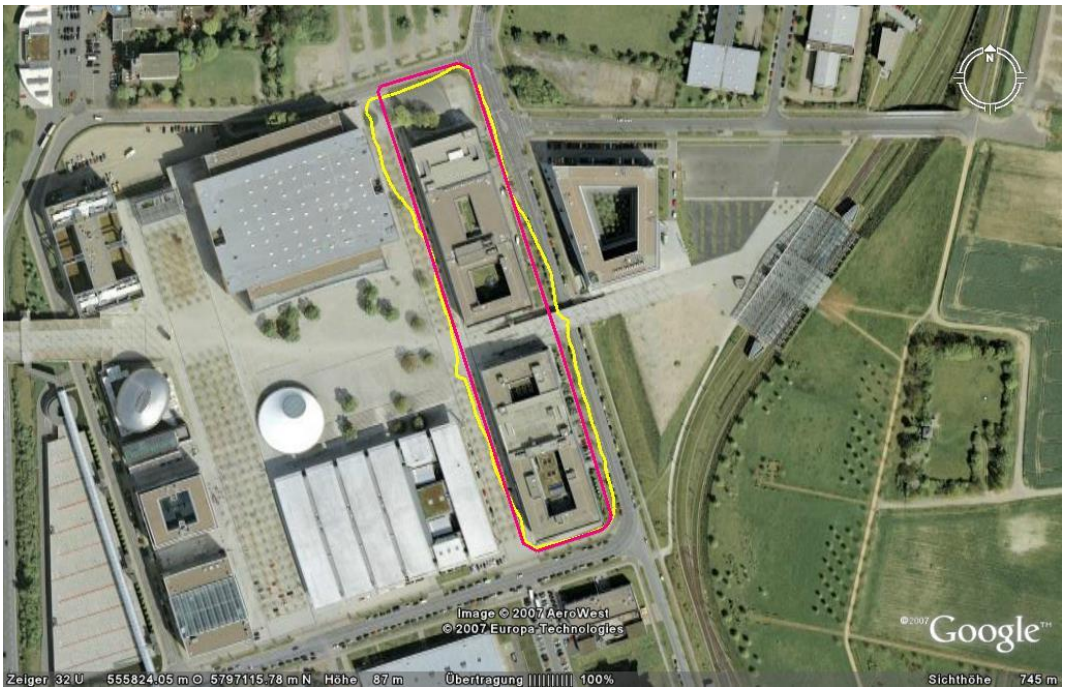


Image © 2007 AeroWest
© 2007 Europa Technologies
©2007 Google
Zeiger 32 U 555824.05 m O 5797115.78 m N Höhe 87 m Übertragung 100%
Sichthöhe 745 m

Abbildung 201: Teststrecke 2.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

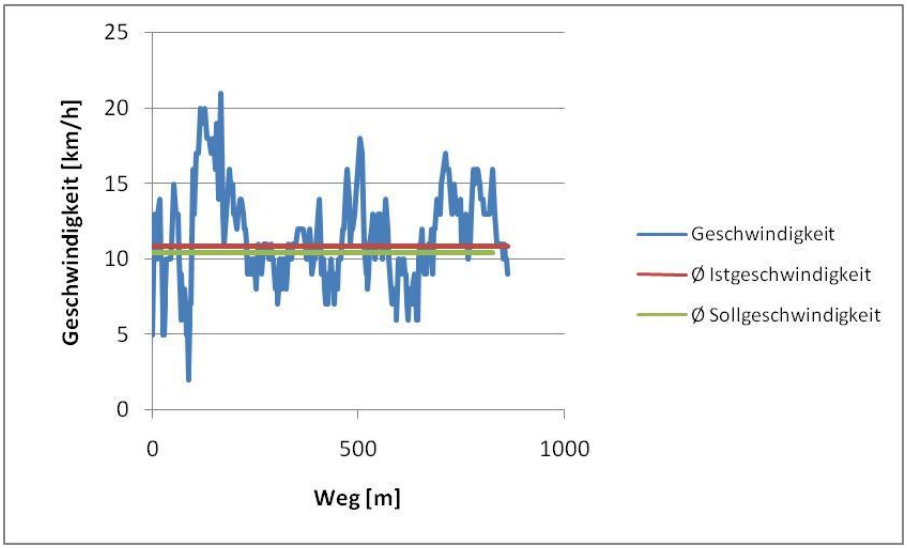


Abbildung 202: Teststrecke 2.0 – Geschwindigkeitsverlauf

In Abbildung 202 ist ein beispielhafter Geschwindigkeitsverlauf der Teststrecke 2.0 dargestellt. Die Mittel aus Soll- und Istwerten unterscheiden sich um 0,43 km/h. Die Abschattungen, die durch Gebäude erzeugt werden, lassen die Geschwindigkeit stark schwanken, was unmittelbar mit der Positionierung und so mit der Distanz zusammenhängt. Werden eine oder mehrere fehlerhafte Positionen bestimmt, wie es in Abbildung 203 unter anderem durch den Fußgängerüberweg geschieht, und kommt es anschließend zu einer stark abweichenden Positionierung (zum Beispiel durch verbesserte Empfangsbedingungen), wird so laut Rechnung ein weiterer Weg in kürzerer Zeit zurückgelegt. Umgekehrt ist es auch möglich, dass Werte prädiziert werden, die zu hoch angesetzt sind. Wird diese schlechte Vorausberechnung erkannt und die tatsächlich zurückgelegte Distanz ist kürzer als erwartet, kommt es zu einer starken Verringerung der Geschwindigkeitswerte. Abbildung 202 weist mehrere Maxima auf. Nach etwa 170 m kommt es zur ersten größeren Schwankung durch die Fußgängerbrücke. Beim darauffolgenden Maximum handelt es sich um eine weitere stark abweichende Positionierung (Abbildung 204), die man dem Geschwindigkeitsverlauf etwa bei 500 m entnehmen kann. Zum Ende der Aufzeichnung kommt es, wie gesagt, zu größeren Schwankungen im nördlichen Teil der Strecke

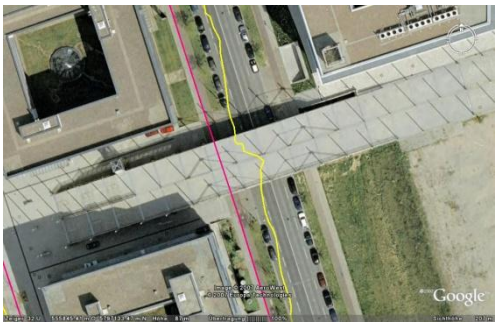


Abbildung 203: Fußgängerüberweg

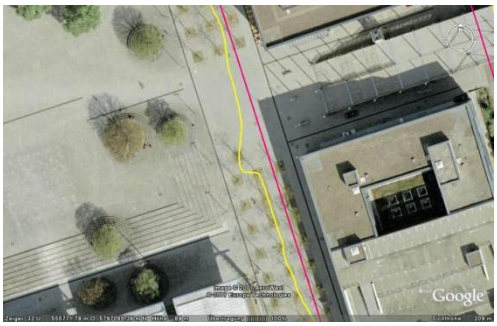


Abbildung 204: westlicher Teil der Strecke

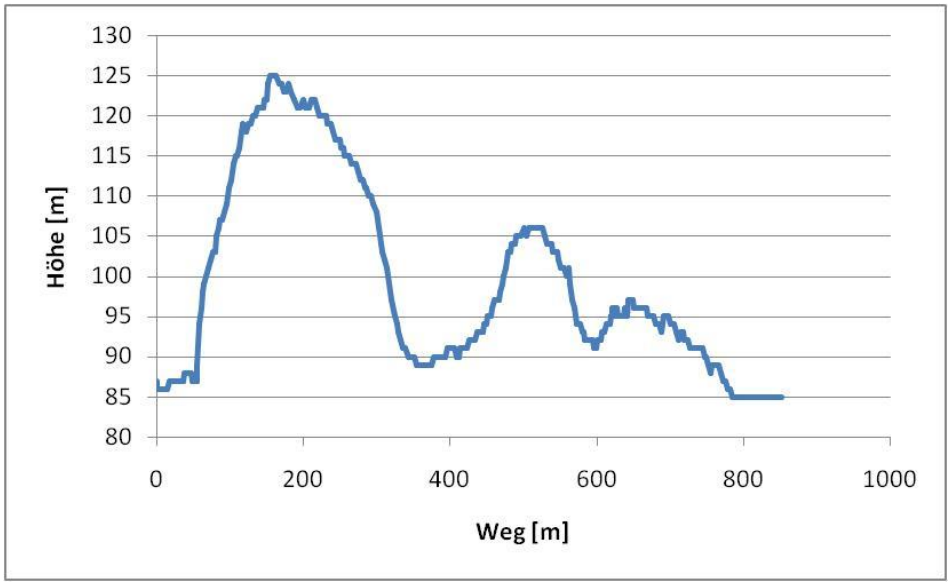


Abbildung 205: Teststrecke 2.0 – Höhenverlauf

Der Höhenverlauf, der in Abbildung 205 dargestellt ist, scheint auf den ersten Blick nicht von den ausgeprägteren Variationen der Werte durch eingeschränkte Sicht betroffen zu sein. Betrachtet man jedoch den Maßstab, so treten hier Höhenunterschiede von bis zu 39 m auf, die auf dieser Strecke (maximal 4 m) nicht vorkommen. Trotzdem erweckt dieses Höhenprofil den Eindruck, als wäre es entweder geglättet oder durch andere Methoden „stabilisiert“ wurden, was bereits bei Teststrecke 1.0 auffällig war.

Teststrecke 2.1 (eingeschränkte Sicht durch Bäume)

Auf Teststrecke 2.1 kam es durch Bäume zu kontinuierlichen Abschattungen zu beiden Seiten der Allee. Die angezeigten Strecken sind in Abbildung 206 visualisiert. Der Mittelwert beträgt 988,75 m und die Standardabweichung 16,7 m. Es wird nur eine Streckengenauigkeit von > 97,1 % erreicht, was jedoch hauptsächlich auf die Läufe in Süd-Nord-Richtung zurückzuführen ist, da sich diese durchweg als zu kurz erweisen, wohingegen Durchgänge in umgekehrter Richtung sehr nah an die 1000 m Sollstrecke herankommen. Dazu muss noch erwähnt werden, dass der Forerunner ab Distanzen > 1000 m nur noch auf volle 10 m rundet.

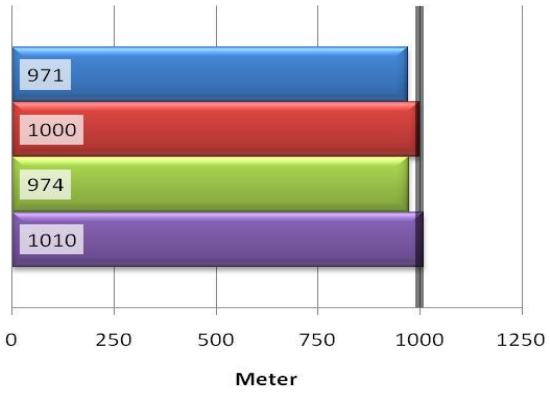


Abbildung 206: Teststrecke 2.1 – Angezeigte Strecken

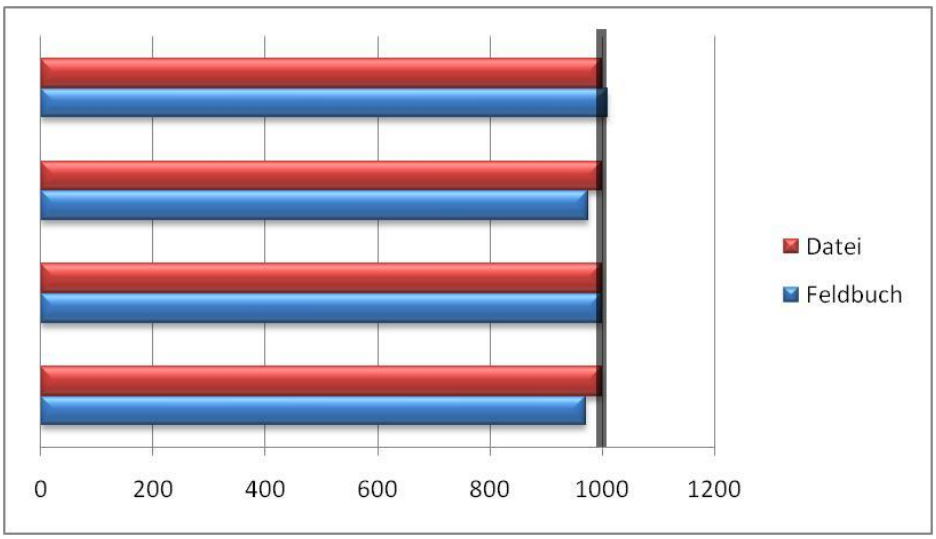


Abbildung 207: Teststrecke 2.1 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Die Analyse der aufgezeichneten Daten erscheint besonders interessant. Hier zeigt sich das alle Läufe mit einer Distanz von 1000 m registriert wurden (siehe Abbildung 207). Fraglich ist aber, warum gerade die beiden Läufe so hohe Differenzen aufweisen, die in Süd-Nord-Richtung durchgeführt wurden. Eine mögliche Ursache ist eine erhöhte Berechnungszeit und die daraus resultierende zeitverzögerte Anzeige. Weiterhin kann man dem Diagramm auch einen Fall von Aufrundung entnehmen (Lauf 4, oben).

Sollstrecke und tatsächlich aufgezeichnete Strecke fallen meist direkt zusammen oder verlaufen wenige Dezimeter nebeneinander (siehe Abbildung 208). Die maximale Querabweichung beträgt ca. 13,13 m, wobei diese Größenordnungen sonst eher ausbleiben. Scheinbar werden die GPS-Signale durch die Laubbäume nur leicht abgeschwächt und sind mit Empfängern mit höherer Eingangsempfindlichkeit (SiRFstarIII im Forerunner 305) wohl fast problemlos zu empfangen.

Image © 2007 AeroWest
© 2007 Europa Technologies
Google
Zeiger 32 U 548446.23 m O 5804085.52 m N Höhe 54 m Übertragung 100% Sichthöhe 358 m

Abbildung 208: Teststrecke 2.1 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

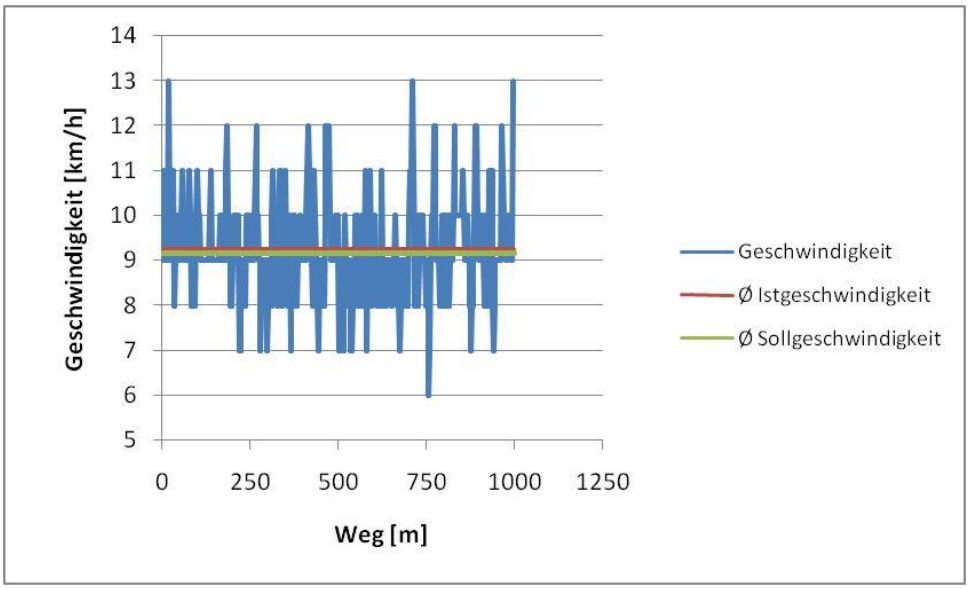


Abbildung 209: Teststrecke 2.1 – Geschwindigkeitsverlauf

Bei den gemessenen Geschwindigkeiten in Abbildung 209 zeigt sich ein für diese Bedingungen relativ gleichmäßiger Verlauf. Die Schwankungen liegen in einem Bereich zwischen 1…4 km/h. Die mittlere Sollgeschwindigkeit und die mittlere aufgezeichnete Geschwindigkeit liegen in diesem Beispiel (Abbildung 209) 0,10 km/h auseinander.

Der Höhenunterschied von etwa 2,30 m über die Distanz von 1000 m ist auch aus den aufgezeichneten Werten (Abbildung 210) ersichtlich. Allerdings können hier nur ganze Höhenmeter entnommen werden, wodurch sich eine Ablesung von 2 m ergibt. Ähnlich wie bei Teststrecke 2.0 wirkt der Verlauf geglättet, ist aber nicht so hohen Schwankungen ausgesetzt.

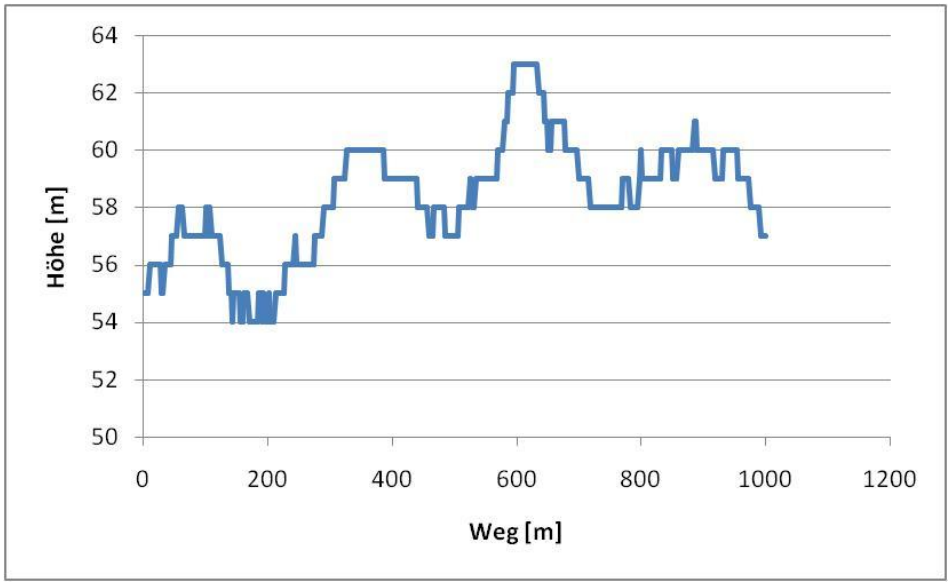


Abbildung 210: Teststrecke 2.1 – Höhenverlauf

Teststrecke 3.0 (stark eingeschränkte Sicht durch Wald)

Teststrecke 3.0 befindet sich in einem Waldstück und bietet somit stark eingeschränkte Sichten. Die angezeigten Distanzen in Abbildung 211 bestätigen dies. Alle gemessenen Strecken sind um mindestens 16 m zu kurz. Die Streckengenauigkeit liegt hier nur noch bei > 92, 8 %.

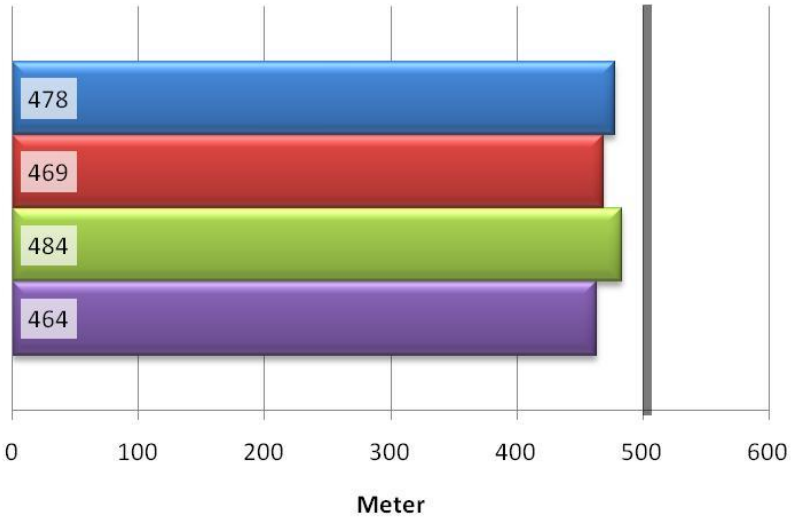


Abbildung 211: Teststrecke 3.0 – Angezeigte Strecken

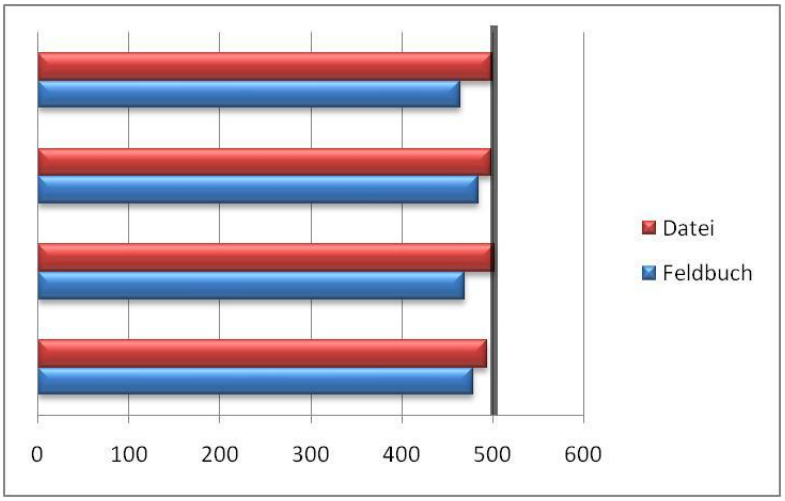


Abbildung 212: Teststrecke 3.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

Die Tests im Wald unterstützen die Vermutung der verlängerten Rechenzeit bei verschlechterten Bedingungen und die damit verbundene Verzögerung der Anzeige (siehe Abbildung 212). Betrachtet man ausschließlich die letztendlich aufgezeichneten Werte, so liegen der Mittelwert bei 498,25 m und die Standardabweichung bei nur 2,86 m. Daraus folgt eine Streckengenauigkeit von immerhin > 98,8 %, was unter derartigen Bedingungen normalerweise nicht zu erwarten wäre.

In Abbildung 213 weicht der aufgezeichnete Track nicht sonderlich von der eigentlichen Strecke ab. Die maximale Querabweichung beträgt hierbei 4,61 m. Während des ganzen Verlaufs deutet nichts auf Signalunterbrechungen oder sogar Signalabbrüche hin. Die Differenzen in den Strecken kommen hauptsächlich durch Verfehlungen des Start- und Zielpunktes und der daraus resultierenden Verkürzungen der Distanz zustande. Dazu sind in Abbildung 214 alle vier Läufe dargestellt. Trotz dieser Verkürzungen um bis zu etwa 15 m allein am Zielpunkt (am Startpunkt kommt es zu ähnlichen Effekten) wurden Distanzen von mindestens 494 m aufgezeichnet.

Abbildung 213: Teststrecke 3.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Abbildung 214: Teststrecke 3.0 – Verfehlungen des Zielpunktes, Sollstrecke (pink)

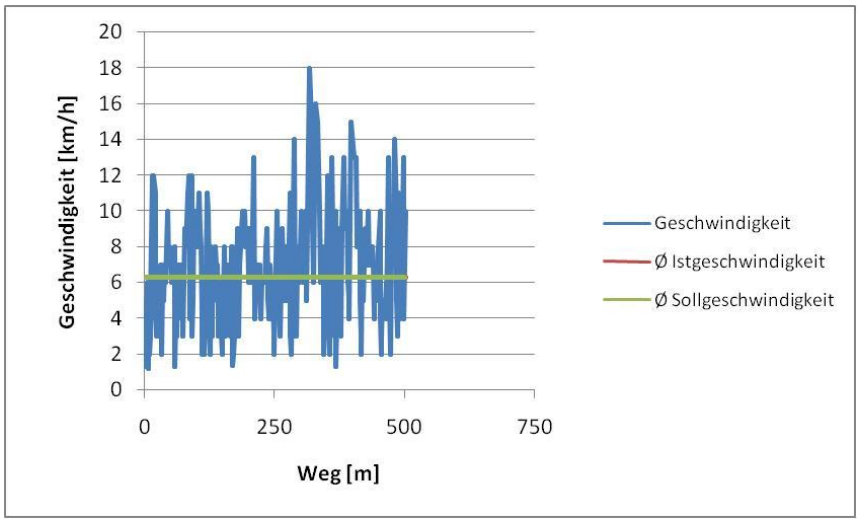


Abbildung 215: Teststrecke 3.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Wie zu erwarten war, wurden während der Läufe stark variierende Geschwindigkeiten aufgezeichnet (Abbildung 215), die bis zu 11 km/h vom Mittelwert abweichen. Der Vergleich zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit offenbart allerdings nur eine sehr kleine Differenz von 0,01 km/h. Unter optimalen Bedingungen sollte eine Genauigkeit von 0,1 km/h erreicht werden können.

Das beispielhafte Höhenprofil in Abbildung 216 zeigt in der Form Ähnlichkeiten zu den auf vorangegangenen Strecken aufgezeichneten Höhenverläufen. Es werden hier zwar wieder große Schwankungen aufgezeigt, wodurch Höhenunterschiede von über 20 m zustande kommen, allerdings wirkt die gesamte Kurve wieder leicht geglättet. Gerade unter schlechten Bedingungen wie bei Läufen im Wald, ist grundsätzlich mit schlagartigeren Schwankungen wie bei den Geschwindigkeitsverläufen zu rechnen.

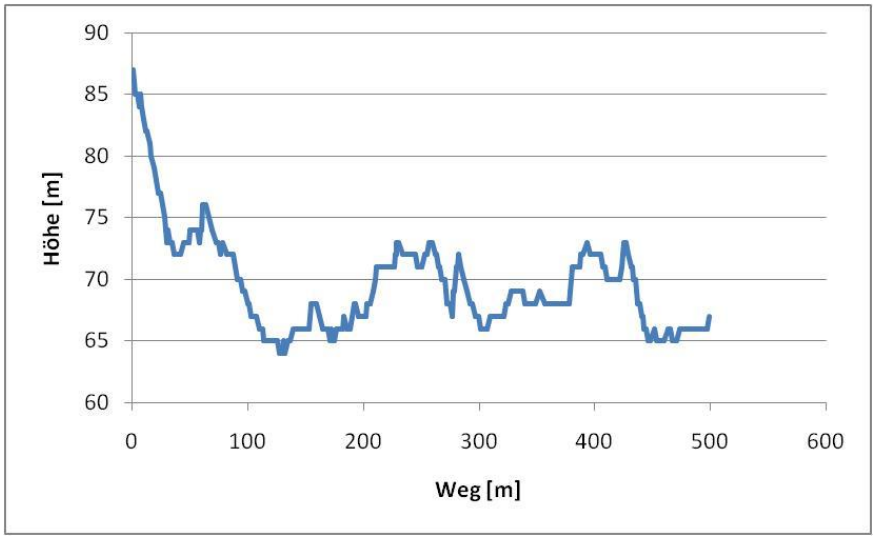


Abbildung 216: Teststrecke 3.0 – Höhenverlauf

Teststrecke 8.0 (kurviger Streckenverlauf)

Teststrecke 8.0 bietet mit den verschiedenen Kurventypen, plötzlichen Spurwechseln sowie einer 180°-Wende viele Möglichkeiten zur Genauigkeitsuntersuchung.

Abbildung 217: Teststrecke 8.0 - Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Abbildung 217 zeigt einen Überblick über die gesamte Strecke 8.0. Dazu wurde ein aufgezeichneter Track (gelb) beispielhaft ausgewählt um ihn mit der Sollstrecke (pink) zu vergleichen. Wie hier ersichtlich wird, kommt es nur an wenigen Stellen überhaupt zu erwähnenswerten Abweichungen der aufgezeichneten Streckenpunkte zu der vorher präzise eingemessenen Sollstrecke (maximale Querabweichung 5,82 m). Um Aussagen über eingesetzte Berechnungsverfahren und Filter treffen zu können, wurden dafür

spezielle Szenarien angelegt. In Abbildung 218 kommt es während des Laufs zu einer 90°-Drehung in einem Punkt. Der Verlauf der Kurve wird hier leicht geglättet, obwohl man bei der ersten Richtungsänderung fast einen rechten Winkel erkennen kann. Es kommt weder zu einem sogenannten „Drift“, noch werden die Kurve charakterisierende Punkte „abgeschnitten“. In Abbildung 219 kann man den gleichen Effekt beobachten. In diesem Fall handelt es sich allerdings um eine leicht abgerundete Kurve, die über 2 Punkte definiert ist, woraufhin die Glättung etwas stärker ausgeprägt ist.

Abbildung 218: 90°-Drehungen in einem Punkt

Abbildung 219: Abgerundete Kurve (2 Punkte)

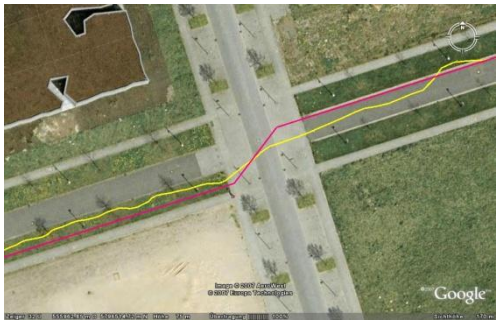


Abbildung 220: Plötzlicher Spurwechsel

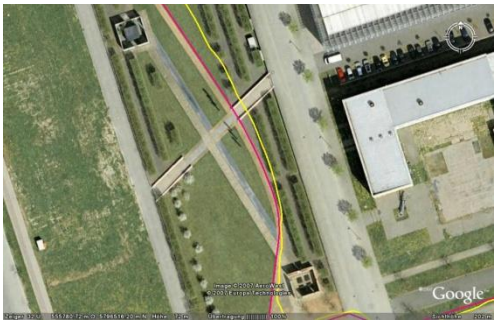


Abbildung 221: Stark abgerundete Kurve

Ein plötzlicher Spurwechsel wie in Abbildung 220 ist fast gar nicht zu erkennen. Hierfür sind einerseits die Glättung und andererseits die Unsicherheiten der Koordinatenbestimmung vor und nach dem Spurwechsel verantwortlich. In Abbildung 221, bei einer langgezogenen, stark abgerundeten Kurve, kommt es zu einem geringen Drift, der aber auch durch die leicht eingeschränkte Sicht, durch die angrenzenden Bäume, verursacht worden sein könnte. Abbildung 222 zeigt eine 180°-Wende in einem Punkt. Das schnelle Umkehren der Richtung wird sofort erkannt, so dass der aufgezeichnete Track bis auf wenige Zentimeter mit der Sollstrecke übereinstimmt.

Im gesamten Streckenverlauf kommt es im Durchschnitt zu Abweichungen von 1…2 m. Dabei zeichnet der Forerunner 305 unter gleichen Bedingungen fast identische Tracks auf, die sich nur an wenigen Stellen voneinander unterscheiden.

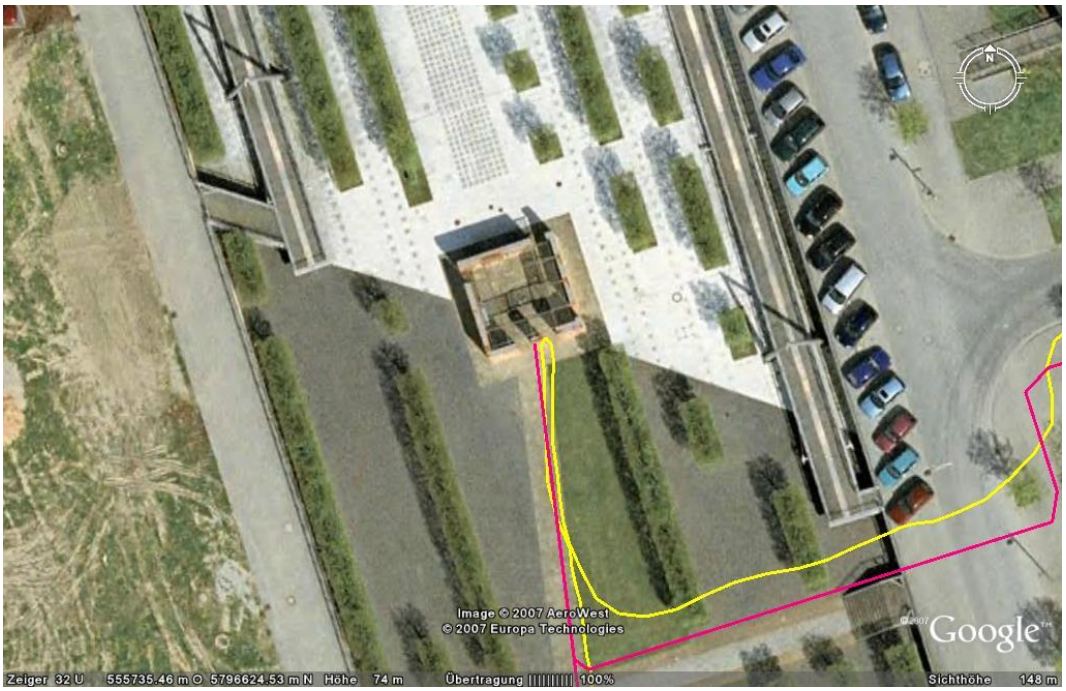


Image © 2007 AeroWest
© 2007 Europa Technologies
Google
Zeiger 32 U 555735.46 m O 5796624.53 m N Höhe 74 m Übertragung 100% Sichthöhe 148 m

Abbildung 222: Schnelle 180°-Wende in einem Punkt

Auskunft über die Genauigkeit des Geschwindigkeits- und Distanzmessers Garmin Forerunner 305 sollten aber vor allen Dingen die angezeigten Strecken geben (Abbildung 223). Der Mittelwert beträgt 1077,50 m (1081,78 m Solldistanz) und die Standardabweichung liegt bei 4,33 m, was zu einer Streckengenauigkeit > 98,9 % führt. Auch hier kommt es wieder zu Abweichungen zwischen angezeigter und aufgezeichneter Distanz (siehe Abbildung 224), wobei die angezeigten Strecken eine höhere Genauigkeit aufweisen.

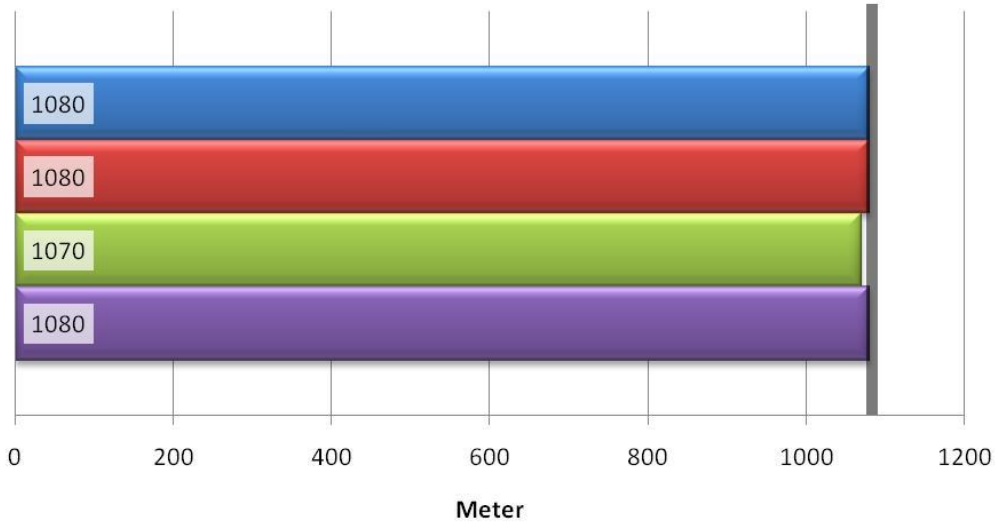


Abbildung 223: Teststrecke 8.0 – Angezeigte Strecken

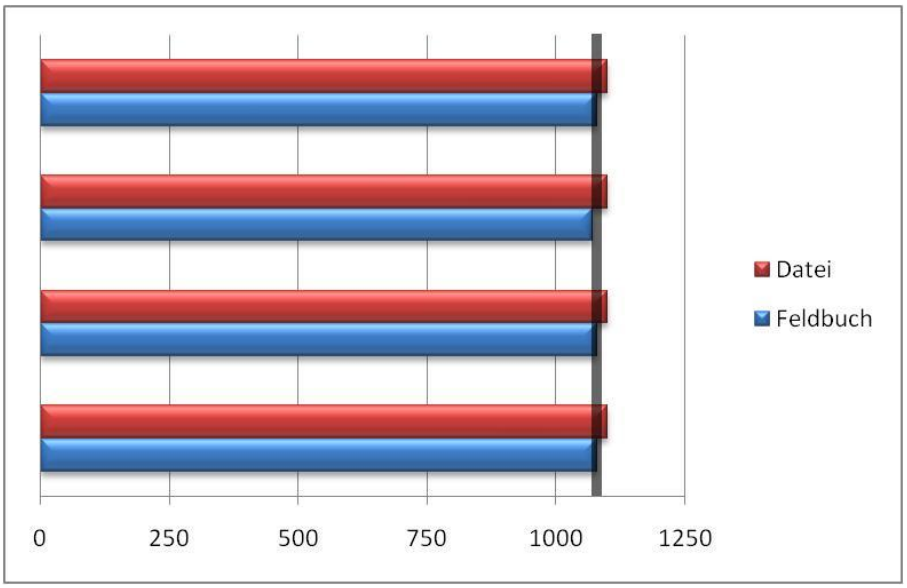


Abbildung 224: Teststrecke 8.0 – Vergleich angezeigte Strecken (Feldbuch), aufgezeichnete Strecken (Datei)

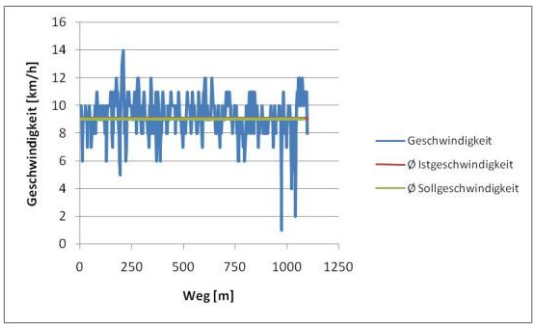


Abbildung 225: Teststrecke 8.0 - Geschwindigkeitsverlauf

Abbildung 226: Plötzliche Signalverbesserung

In Abbildung 225 wird der Geschwindigkeitsverlauf über die gesamte Strecke dargestellt. Es kommt zu Schwankungen von mehreren km/h, wobei der Vergleich zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit nur eine Differenz von 0,05 km/h aufweist. Auffällig ist besonders das Minimum im letzten Teil des Verlaufs. Hier kommt es zu einer fehlerhaften Koordinatenbestimmung, wie in Abbildung 226 zu sehen ist. Die daraus bestimmte Strecke wird kleiner, wodurch sich im Endeffekt auch die Geschwindigkeit verringert.

Das in Abbildung 227 beispielhaft dargestellte Höhenprofil, das die Topographie der Teststrecke 8.0 recht gut beschreibt, fällt durch die wenigen sprunghaften Veränderungen erneut ins Auge. Dies unterstreicht die Vermutung, dass beim Forerunner 305 ein spezieller Höhenglättungsfilter zum Einsatz kommt.

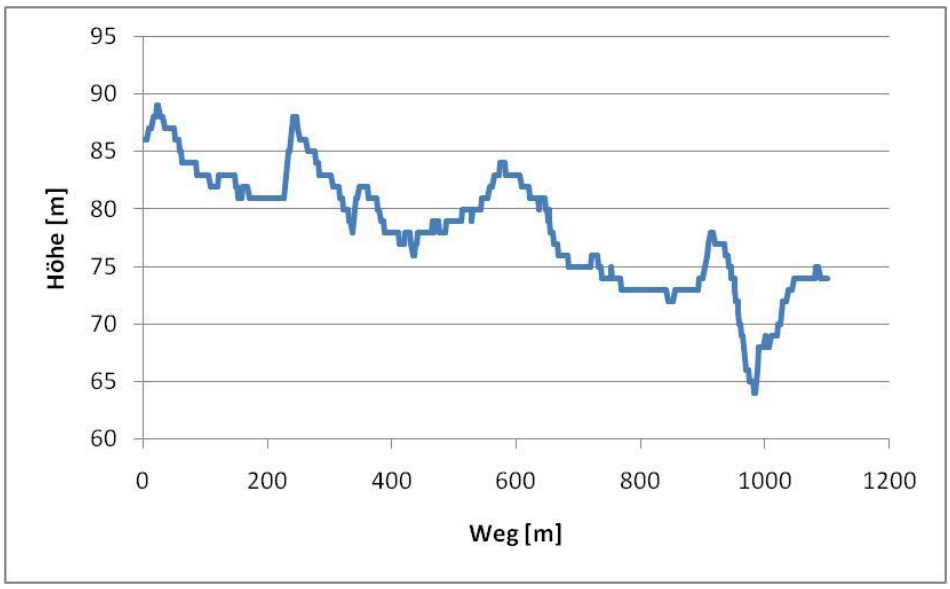


Abbildung 227: Teststrecke 8.0 - Höhenverlauf

Teststrecke 9.0/9.1 (Signalunterbrechung/-abbruch)

Auf den Teststrecken 9.0 und 9.1 sollte die Genauigkeit bei Signalabbruch bzw. Signalunterbrechung untersucht werden. Dafür wurden zwei verschiedene Brücken gewählt, die für den gewünschten Effekt sorgen sollten (siehe Teststrecken). Die Tests wurden in zwei Arten unterteilt: Der Brücken- bzw. Tunneldurchlauf zur Simulation einer vorübergehenden Signalunterbrechung und das Anhalten unter der jeweiligen Brückenmitte. Bei letzterem ging es darum das weitere Verhalten der Geräte innerhalb von 30 Sekunden nach komplettem Signalabbruch zu analysieren.

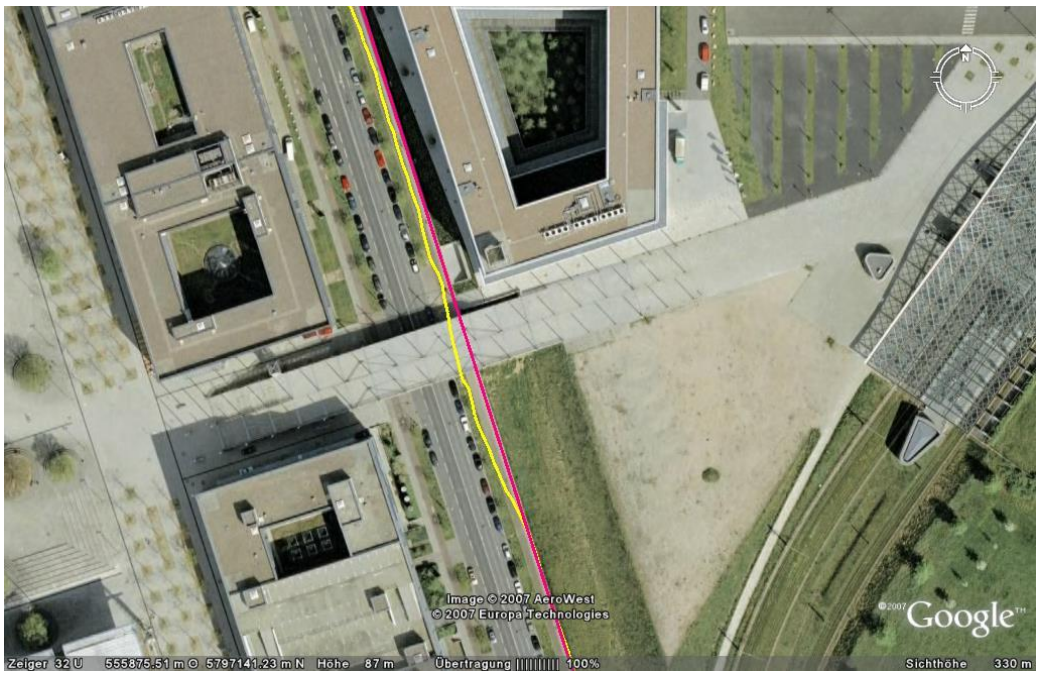


Image © 2007 AeroWest
© 2007 Europa Technologies
©2007 Google
Zeiger 32 U 555875.51 m O 5797141.23 m N Höhe 87 m Übertragung 100% Sichthöhe 330 m

Abbildung 228: Teststrecke 9.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

In Abbildung 228 wird einer der Tunneldurchläufe dargestellt. Bei keinem der aufgezeichneten Tracks kann eine Abweichung klar der Signalunterbrechung durch den Fußgängerüberweg zugeordnet werden. Betrachtet man jedoch den Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 229, so sieht man eindeutig ein Maximum an der Stelle der Signalunterbrechung. Es scheinen hier weniger Querabweichungen als vielmehr Abweichungen in Längsrichtung aufzutreten, die man bei dem angezeigten Streckenverlauf kaum sehen kann.

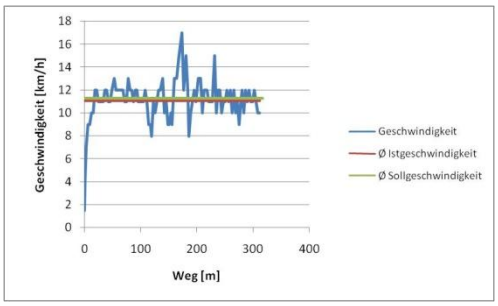


Abbildung 229: Teststrecke 9.0 – Geschwindigkeitsverlauf (Durchlauf)

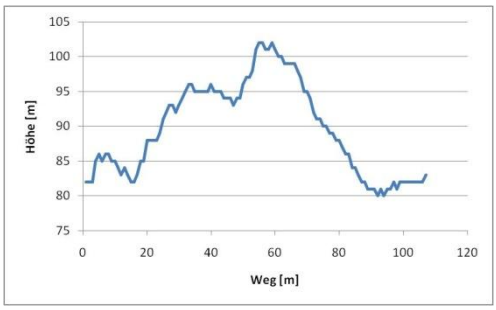


Abbildung 230: Teststrecke 9.0 – Höhenverlauf (Durchlauf)

Die aufgezeichneten Höhen in Abbildung 230 könnten einen Höhenunterschied von über 20 m erwarten lassen, obwohl dieser tatsächlich maximal 3,85 m beträgt. Bei eingeschränkten Sichten durch Gebäude sowie Signalunterbrechung kommt es also zu groben Fehlmessungen der Höhenkomponente per GPS.

Alle angezeigten Strecken (siehe Abbildung 231) werden, im Vergleich zur Sollstrecke (317 m) zu kurz gemessen. Die Streckengenauigkeit liegt nach Signalunterbrechung bei > 98,1 %. Bei Teststrecke 9.1 wird durch die etwas längere Unterbrechung nur noch eine Genauigkeit von > 97,8 % erreicht (Abbildung 232).

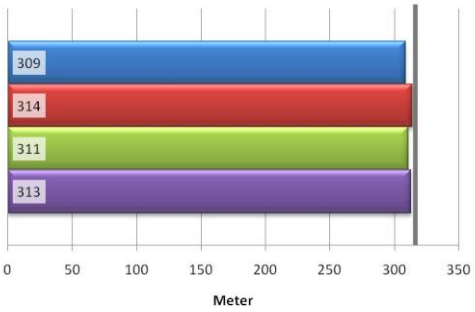


Abbildung 231: Teststrecke 9.0 – Angezeigte Strecken

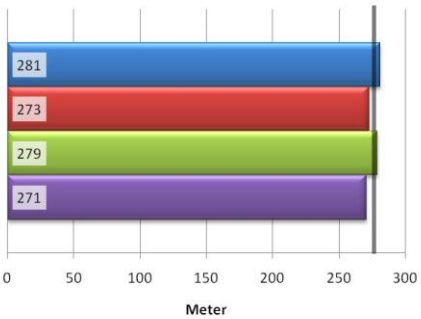


Abbildung 232: Teststrecke 9.1 – Angezeigte Strecken

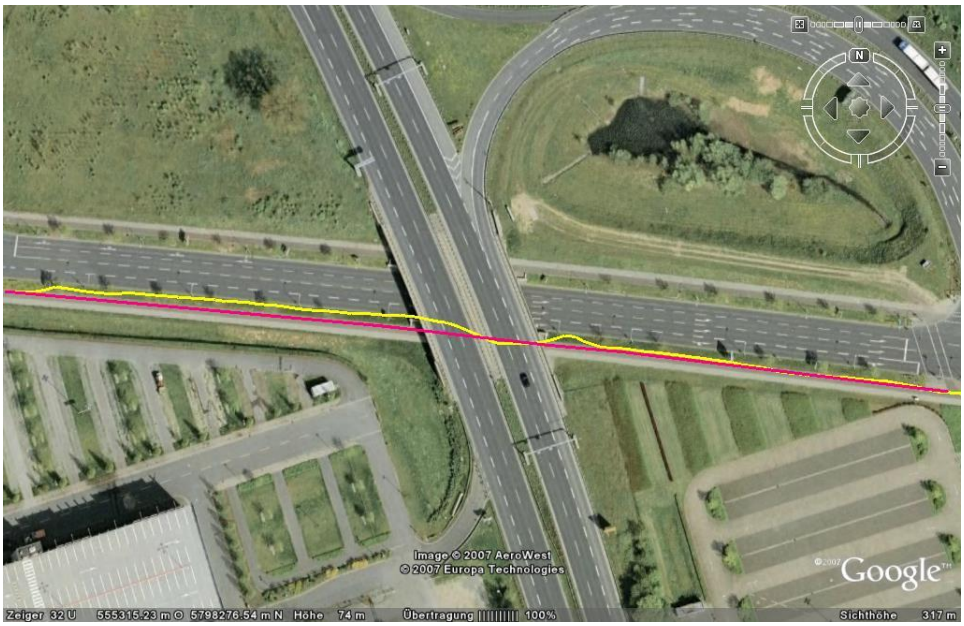


Image © 2007 AeroWest
© 2007 Europa Technologies
Google
Zeiger 32 U 555315.23 m O 5798276.54 m N Höhe 74 m Übertragung 100% Sichthöhe 317 m

Abbildung 233: Teststrecke 9.1 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

Die Brücke des Messeschnellwegs, die den Fußweg entlang der Hermesallee und damit die Teststrecke 9.1 überführt hat an dieser Stelle eine Breite von ca. 35 m. Hier kommt es zu zur besagten längeren Signalunterbrechung. In Abbildung 233 lässt sich bezüglich des aufgezeichneten Tracks ein anderer Effekt als auf Teststrecke 9.0 beobachten: Ab dem Zeitpunkt der Unterbrechung kommt es zu Unsicherheiten. Die Position wird zwar weiterhin vorausberechnet, erfährt aber anscheinend diverse Störeinflüsse, so dass es zu keiner linearen Prädiktion kommt, woraus wiederum die dargestellten Querabweichungen resultieren. Auch hier verringern sich die Abweichungen zur Sollstrecke nach Wiedererlangen des Empfangs recht schnell. Abbildung 234 zeigt den typischen Geschwindigkeitsverlauf, wobei ein Maximum mit anschließendem Minimum kurz nach der vermeintlichen Signalunterbrechung zu erkennen ist.

Wie aus Abbildung 235 hervorgeht, kommt es erneut zu einem sehr großen Höhenunterschied, der so auf Teststrecke 9.1 nicht vorkommt. Allerdings kann man hier fast von einem falschen Maßstab sprechen, da die äußere Form, den tatsächlichen Höhenverlauf der Strecke recht gut beschreibt.

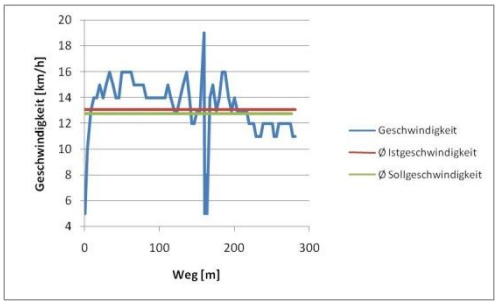


Abbildung 234: Teststrecke 9.1 – Geschwindigkeitsverlauf (Durchlauf)

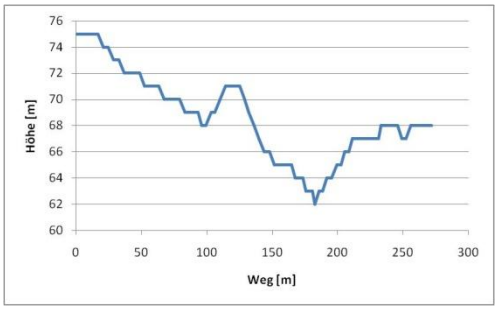


Abbildung 235: Teststrecke 9.1 – Höhenverlauf (Durchlauf)

Auf beiden Strecken lässt sich nun auch noch das Verhalten der Strecken bei Signalabbruch untersuchen. Auf Teststrecke 9.0 (siehe Abbildung 236) verlaufen die Tracks, aufgrund der leicht eingeschränkten Sicht durch Gebäude auf der anderen Straßenseite der Weltausstellungsallee, schon vor dem Signalabbruch parallel zur eigentlichen Sollstrecke. Nach dem Erreichen der Brückenmitte wird der Weg zunächst weiter vorausberechnet, bevor er dann seitlich abdriftet. In Abbildung 237 ist noch viel deutlicher zu erkennen, dass es direkt nach Signalabbruch zu großen Unsicherheiten kommt und dadurch fehlerhafte Koordinaten aufgezeichnet werden. Bei dem relativ schmalen Fußgängerüberweg kommt es teilweise noch zu Verkürzungen der Distanzen nach 30 Sekunden (siehe Abbildung 238). Der Grund hierfür ist, mit großer Wahrscheinlichkeit, eine zu optimistische Vorausberechnung, die durch Empfang einzelner Signale wieder korrigiert wird. Bei dem Vergleich der angezeigten Distanzen auf Strecke 9.1 in Abbildung 239 ist dies nicht der Fall.

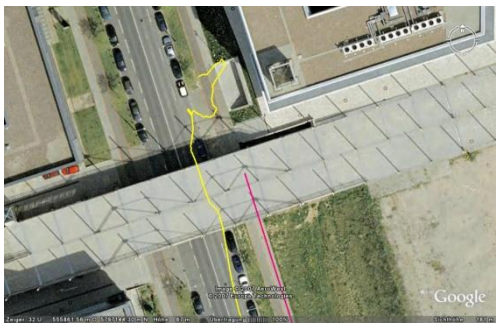


Abbildung 236: Teststrecke 9.0 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

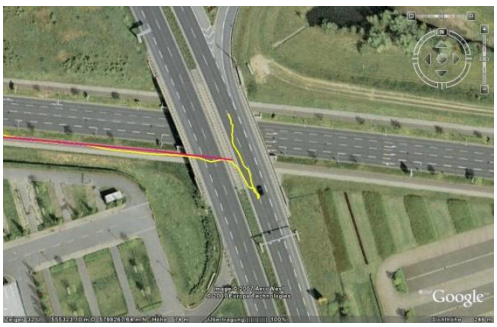


Abbildung 237: Teststrecke 9.1 – Sollstrecke (pink), aufgezeichneter Track (gelb)

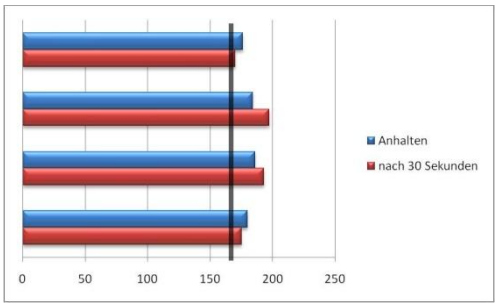


Abbildung 238: Teststrecke 9.0 – Angezeigte Strecken

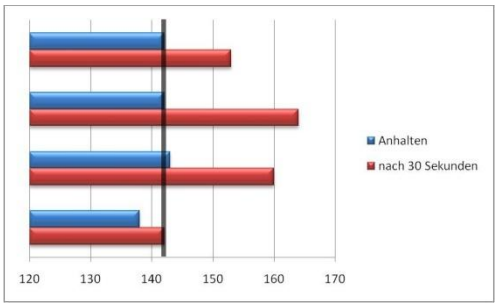


Abbildung 239: Teststrecke 9.1 – Angezeigte Strecken

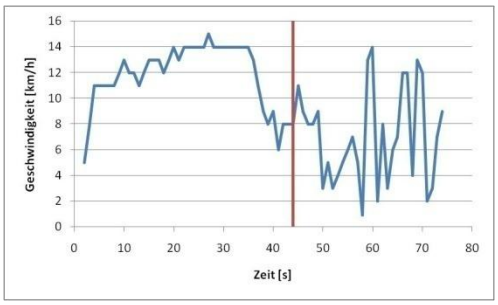


Abbildung 240: Teststrecke 9.1 – Geschwindigkeitsverlauf (Signalabbruch)

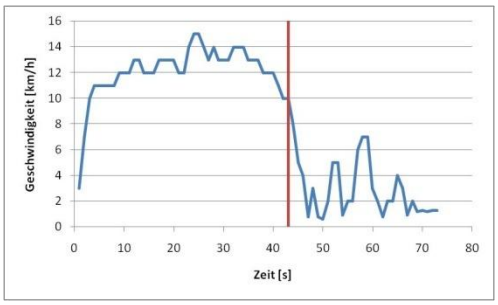


Abbildung 241: Teststrecke 9.1 – Geschwindigkeitsverlauf (Signalabbruch)

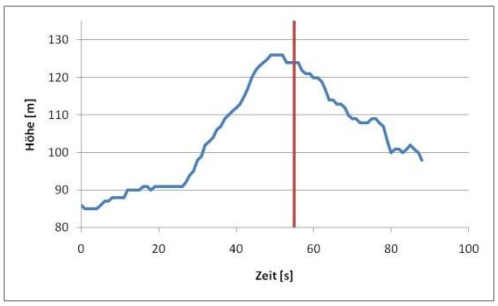


Abbildung 242: Teststrecke 9.0 – Höhenverlauf (Signalabbruch)

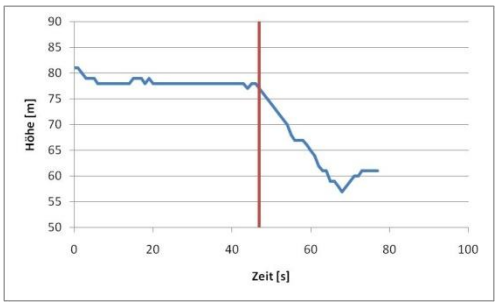


Abbildung 243: Teststrecke 9.1 – Höhenverlauf (Signalabbruch)

Bei den Geschwindigkeitsverläufen treten zwei unterschiedliche Fälle ein. In Abbildung 240 bleibt das berechnete Tempo nach Signalabbruch auf dem gleichen Niveau, wird aber daraufhin starken Schwankungen unterzogen. In Abbildung 241 kommt es hingegen zunächst zu einer starken Verringerung der Geschwindigkeit, gefolgt von Schwankungen in einem kleineren Bereich.

Die Höhenprofile (Abbildung 242 und Abbildung 243) verhalten sich nach dem Signalabbruch sowohl bei allen Läufen als auch bei beiden Teststrecken ähnlich. Dabei kommt es immer zu einer recht linear abfallenden Kurve.

Teststrecke 10.0 (plötzliches Anhalten)

Mit Hilfe von Teststrecke 10.0 kann das Verhalten des Forerunner 305 nach einem plötzlichen Anhalten getestet werden. Es kommt zu keinerlei sonstiger Fehlereinflüsse wie z.B. Abschattungen. In Abbildung 244 wird ersichtlich, dass sich die Distanzen bis zum Haltepunkt und die endgültig angezeigten Strecken (nach 30 Sekunden) trotzdem unterscheiden.

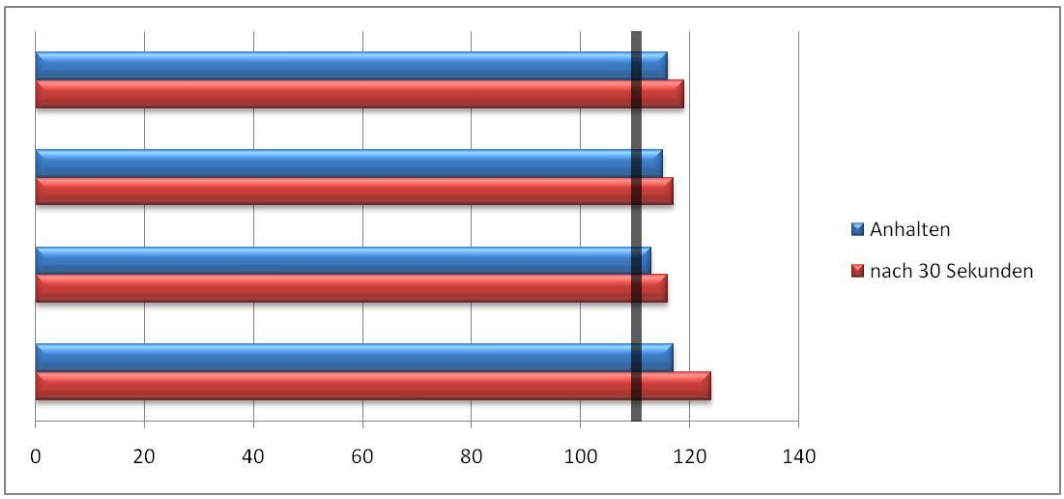


Abbildung 244: Teststrecke 10.0 – Angezeigte Strecken (Sollstrecke 110 m)

Nicht nur die zeitverzögerte Anzeige/Berechnung oder auch Filterung der Messwerte führt zu einer Zunahme der Distanzen über die Zeit, sondern auch ungenaue Positionsbestimmungen, aus denen, wie in Abbildung 245 deutlich wird, Strecken und dementsprechend auch Geschwindigkeiten berechnet werden. Es handelt sich zwar nur noch um kleine Schwankungen < 1 m, die sich jedoch mit der Zeit aufsummieren, was sich besonders gut bei den Höhen zeigt. Diese nehmen bis zum Ende der Aufzeichnung immer größere werdende Werte an, wie in Abbildung 246 ersichtlich wird.

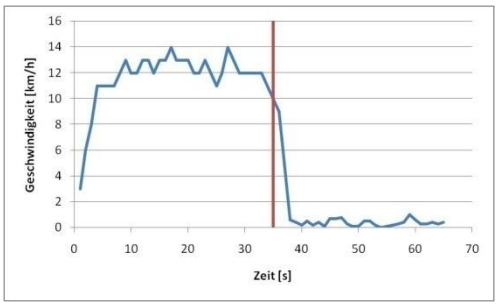


Abbildung 245: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf

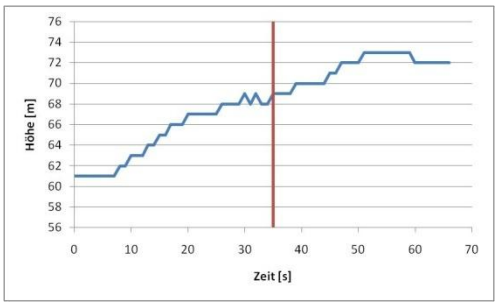


Abbildung 246: Teststrecke 10.0 - Höhenverlauf

Testpfeiler MD

Zur Untersuchung der absoluten Lage- und Höhengenauigkeit wurde der Forerunner auf dem Messdach des Geodätischen Instituts der Universität Hannover getestet. Die dort aufgestellten Pfeiler sind koordinatenmäßig exakt bekannt, was einen Soll-Ist-Vergleich ermöglicht. Die Dauer der Aufzeichnung betrug 60 Minuten.

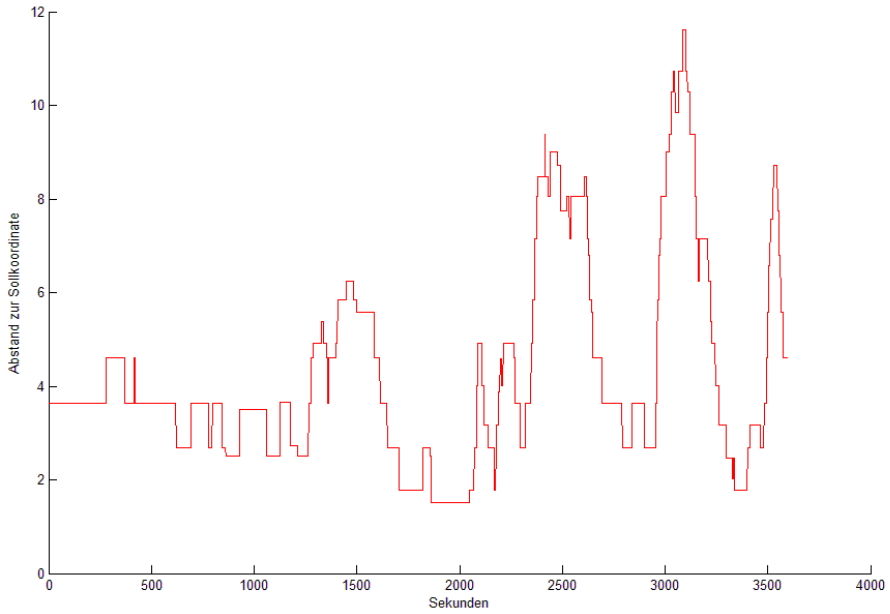


Abbildung 247: Messdach – Lagegenauigkeit

Abbildung 247 zeigt die jeweiligen Abstände zur Sollkoordinate über die Zeit. Es ergibt sich ein Mittelwert der Abweichungen vom Sollpunkt von 4,26 m, wobei sich die Werte in einem Bereich zwischen 1,51 m und 11,61 m bewegen. Die Standardabweichung beträgt 2,15 m. Laut Herstellerangaben soll eine Positionsgenauigkeit von < 10 m (RMS) erreicht werden, was hier, über den größten Zeitraum gesehen, auch der Fall ist. Interessanterweise werden die Abstände zur Sollkoordinate zum Ende der Session immer größer und schwanken auch wesentlich stärker. Die erreichbare Genauigkeit mit WAAS-/EGNOS-Korrekturdaten von < 5 m kann hier nur in den ersten 20 Minuten der Session erzielt werden.

Einen Überblick über die Verteilung der bestimmten Positionen erhält man in Abbildung 248, wobei sich alle ermittelten Koordinaten nördlich der Sollkoordinate befinden.

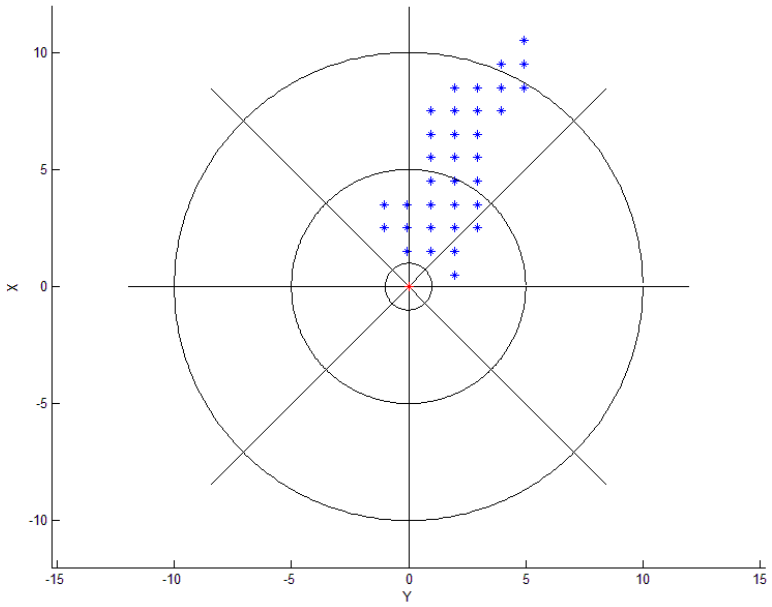


Abbildung 248: Messdach – Positionsgenauigkeit

Die Differenzen zur Sollhöhe sind in Abbildung 249 dargestellt. Es kann eine Genauigkeit für die Bestimmung von absoluten Höhen < 6 m festgestellt werden. Typisch für GPS-Messungen ist das gleiche Verhalten von Lage und Höhe, wobei letztere meist etwas ungenauer bestimmt werden kann. Treten bei der Betrachtung der Abstände größere Schwankungen auf, ist dies auch bei den Höhen der Fall.

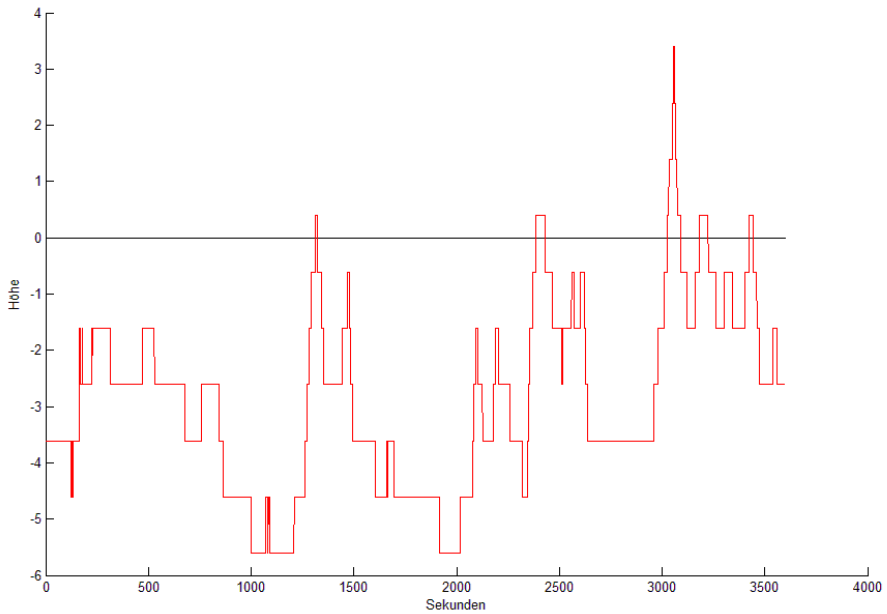


Abbildung 249: Messdach – Höhengenauigkeit

Teststrecke 4.0/4.1 (Höhen)

Zur Genauigkeitsbetrachtung der Höhen wurde der Forerunner 305 auf Teststrecke 4.0 und 4.1 getestet.

In Abbildung 250 werden die relativen Höhen, reduziert auf die Anfangshöhe, dargestellt. Die Überquerung des künstlich angelegten Hügels (siehe Teststrecke 4.0) verläuft recht gleichmäßig, weshalb hier zunächst einmal nur an signifikanten Stellen sowohl zur Einmessung der Strecke als auch bei den Tests Höhen gemessen bzw. abgelesen wurden. Es kommt dabei meist nur zu kleineren Abweichungen von jeweils 1…2 m, ausgenommen Lauf 3.

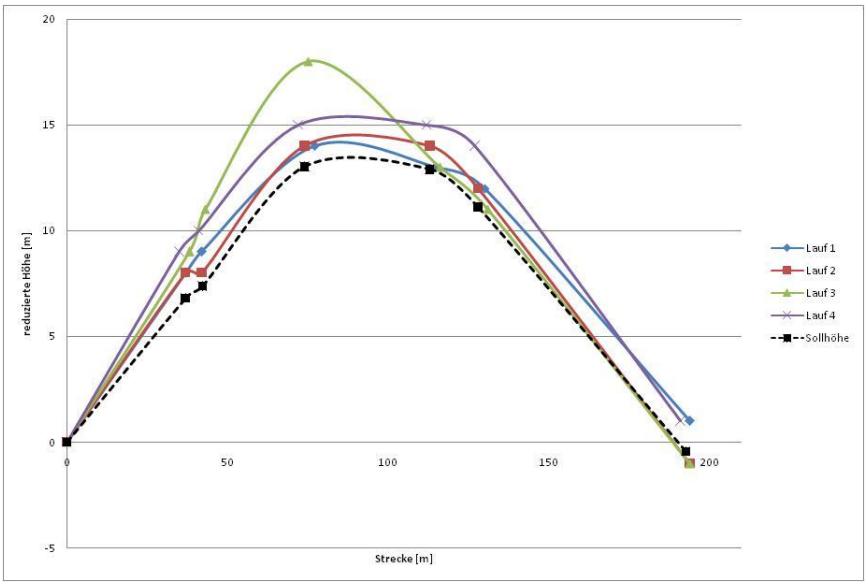


Abbildung 250: Teststrecke 4.0 – Relative Höhen

Während Abbildung 251 einen einzelnen typischen Höhenverlauf aus den aufgezeichneten Werten aufzeigt, werden in Abbildung 252 alle 4 Läufe in einem Diagramm, kombiniert mit der relativen Sollhöhe, dargestellt.

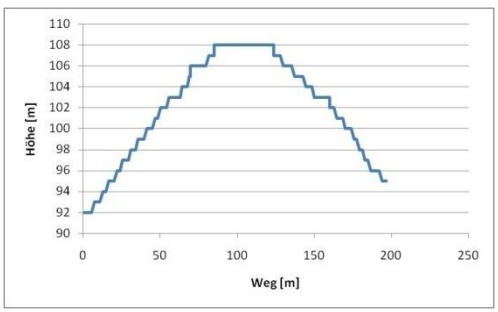


Abbildung 251: Teststrecke 4.0 – Einzelner Höhenverlauf

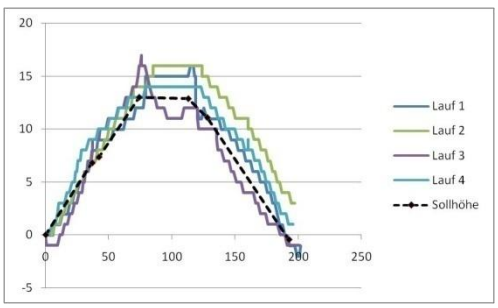


Abbildung 252: Teststrecke 4.0 – Vergleich aller Läufe mit relativer Sollhöhe

Teststrecke 4.1 bietet eine gleichmäßige Steigung bzw. ein gleichmäßiges Gefälle über eine längere Strecke von 259 m (siehe Teststrecken). Hier fanden weitere Genauigkeitsuntersuchungen statt. Dabei wurden zwei Höhen genau gemessen, wodurch ein Höhenunterschied von 12,41 m zustande kommt. An diesen beiden Stellen wurden daraufhin auch die Ablesungen vorgenommen. Reduziert auf die Anfangshöhe ergeben sich Abweichungen zur Sollhöhe auf der Krone des Gipfels zu maximal 2,41 m (Lauf 2), wie man in Abbildung 253 erkennen kann.

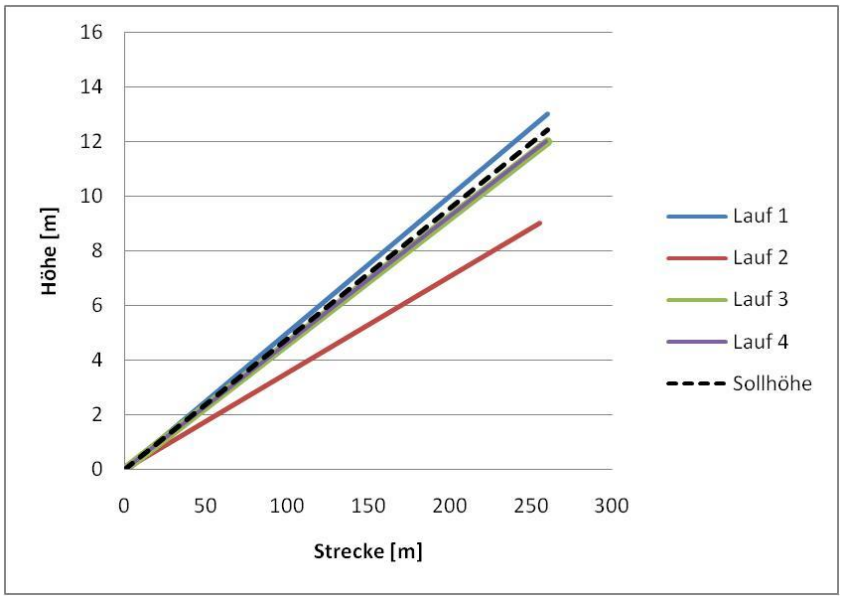


Abbildung 253: Teststrecke 4.1 – Relative Höhen

Abbildung 254 zeigt erneut ein einzelnes Höhenprofil, das sich durch seinen sehr gleichmäßigen Verlauf und einem Höhenunterschied von 12 m auszeichnet. Beim Garmin Forerunner 305 entspricht die Anzeige also auch den aufgezeichneten Höhen. In Abbildung 255 kommt es lediglich bei Lauf 4 zu größeren Schwankungen im Verlauf der Steigung, während sich alle anderen Höhenprofile sehr gleichmäßig verhalten.

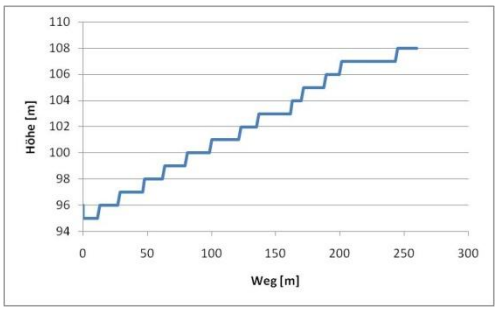


Abbildung 254: Teststrecke 4.1 – Einzelner Höhenverlauf

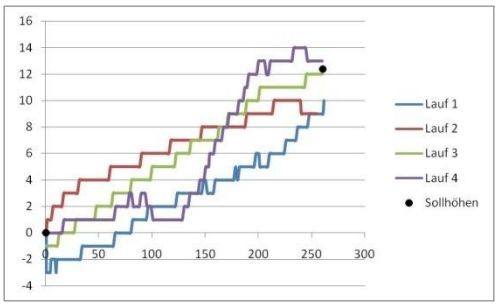


Abbildung 255: Teststrecke 4.1 – Vergleich aller Läufe mit relativer Sollhöhe

4.4.5 Zusammenfassung

Der Garmin Forerunner 305 ist ein ausgereifter Geschwindigkeits- und Entfernungsmesser. Die Bedienung ist leicht verständlich und teilweise rein intuitiv möglich, trotzdem wird eine Vielzahl an Funktionen angeboten. Das Display ist übersichtlich und auch die Menüs sind gut eingeteilt. Einzig und allein das Kartenmenü wird bei längeren Distanzen etwas unübersichtlich, da es keinerlei Möglichkeiten gibt, den angezeigten Track zu verschieben. Man kann hier nur den Anzeigemaßstab ändern. Denkbar wäre auch eine direkte Koordinatenausgabe, die das Gerät, im Gegensatz zu älteren Produkten, nicht bietet. Der Stromverbrauch ist gering und auch die Ladezeiten sind sehr kurz. Nützlich ist dabei auch das gleichzeitige Laden des Geräts bei Verbindung über das mitgelieferte USB-Kabel mit einem PC/Notebook. Der Speicher könnte hingegen etwas größer sein, wenn man mehrere genau aufgezeichnete Tracks erhalten will und die Daten nicht täglich auslesen kann. Die angegebene Aufnahmezeit von 3,5 Stunden kann aber auch so bei einem einzigen Training bereits überschritten werden.

Die aufgezeichneten Strecken treffen häufig den wahren Streckenverlauf, wobei die Streckengenauigkeit nur selten bei > 99 % liegt. Bezieht man sich jedoch auf die letztendlich gespeicherten Werte, so bietet sich meist ein anderes Bild: Hier werden fast immer Streckengenauigkeiten über 99 % erreicht. Diese Verzögerung der Anzeige der einzelnen Werte war sehr auffällig. In fast allen Fällen gestaltete sich die tatsächlich aufgezeichnete Distanz länger als die zu diesem Zeitpunkt angezeigte Strecke, wobei die Differenzen abhängig von den äußeren Bedingungen waren. Anscheinend rufen schlechtere Bedingungen längere Berechnungszeiten hervor, die dann eine dementsprechend zeitverzögerte Weitergabe an die Ausgabeschnittstelle zu verantworten haben. Während Abschattungen durch Bäume weniger Probleme mit sich bringen, kommt es bei eingeschränkten Sichten durch Gebäude zu größeren Unsicherheiten und dadurch teilweise zu ganzen parallelen Verschiebungen des aufgezeichneten Tracks. Besonders wichtig für die Genauigkeit ist auch der Empfang von EGNOS-Korrekturdaten und der Konstellation der Satelliten. Häufig kann die Distanz von Läufen in Nord-Süd-Richtung dadurch genauer bestimmt werden als in Süd-Nord-Richtung. Dabei ist darauf zu achten, dass der Nutzer selbst für größere Abschattungen sorgt (in Laufrichtung nach hinten). Komplette Signalabbrüche oder längere Unterbrechungen wirken sich meist unterschiedlich aus. Betrachtet man das Kurvenverhalten des Forerunner 305, so erkennt man teilweise recht starke Glättungen. An manchen Stellen kommt es auch zu kleineren „Drifts“. Eine große Schwierigkeit für GPS-Messungen stellt beim Forerunner die ständige Bewegung des Arms in verschiedene Richtungen dar. Um größere Schwankungen zu vermeiden, wird eine Filterung der Messwerte bzw. der Koordinaten verwendet. Bei den Höhen kommt zur Stabilisierung scheinbar eine spezielle Methode zur Anwendung. Die erreichbare Genauigkeit ist beim Garmin Forerunner 305 in Lage und Höhe abhängig von den Empfangsbedingungen, wobei die absolute Positionierung bei optimalen Bedingungen teilweise auch größere Unsicherheiten aufweist.

4.4 Garmin Forerunner 305

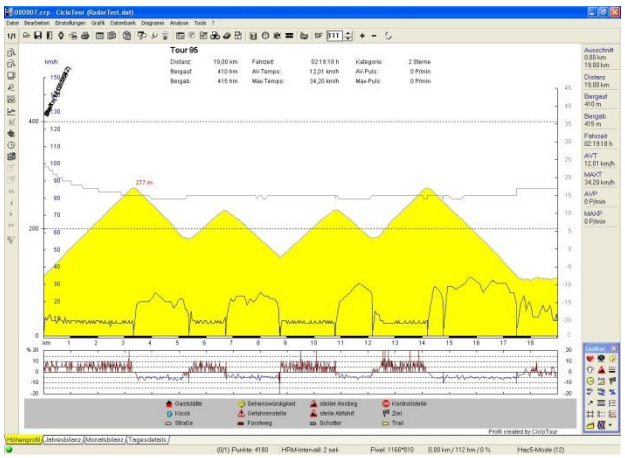
4.5 Ciclosport HAC 5

Hersteller:	Ciclosport
Bezeichnung/Modell:	HAC 5
Eingesetzte(s) Messverfahren:	Fahrradcomputer, Barometrische Höhenmessung, (Radar)
Funktionen:	Distanz, Geschwindigkeit, Höhe, Kalorienverbrauch, Puls, Uhrzeit/Datum, Stoppuhr, Alarmfunktion, Temperatur, bei Gebrauch als Fahrradcomputer Trittfrequenz und Leistung
Maße (BxHxT):	51,2 x 53,9 x 15,5 mm
Gewicht:	51 g
Lieferumfang:	HAC5 Computer, Armband, Lenkerhalter, Pulsmesser (Brustgurt),USB-Kabel, Geschwindigkeitssender, Speichenmagnet, Trittfrequenzsender, Trittfrequenzmagnet, 4 Knopfbatterien, Montagematerial, Kurzanleitung, CD-ROM mit Handbuch und Auswertungssoftware
Akkulaufzeit:	Keine Angaben
Preis:	ca. 360.- €

4.5.1 Gerätebeschreibung

Der HAC5 der Firma Ciclosport stellt in erster Linie einen Fahrradcomputer dar, was auch an den beigelegten Materialien des Lieferumfangs sichtbar wird. Als Zubehör kann das ca. 135 € teure RDS II (Radar Distance System) erworben werden, wodurch Geschwindigkeits- und Streckenmessungen unabhängig von der Sportart ermöglicht

werden soll. Die Funktionen des reinen Fahrradcomputers HAC5 können so auf eine Vielzahl von Sportarten ausgeweitet werden.
Der HAC5 bietet insgesamt 95 Funktionen. Neben den klassischen Parametern wie Geschwindigkeit, Distanz, Trittfrequenz, Herzfrequenz und Leistungsausgabe beim Fahrradfahren besitzt er sowohl Thermometer als auch Barometer zur Höhenmessung (Höhe, Steigung, Steiggeschwindigkeiten, statistische Steigungswerte) und Wettervorhersage. Der Lieferumfang umfasst alle notwendigen Komponenten für die Nutzung als Fahrradcomputer. Das 38-seitige Handbuch ist in 6 Sprachen in digitaler Form auf der CD enthalten, welche außerdem Auswertungssoftware bereitstellt. Eine Kurzbedienungsanleitung in englischer und deutscher Sprache ist dem Set beigelegt.
Die verschiedenen Sensoren (Pulsmesser, Geschwindigkeits- und Trittfrequenzsensor) sind kabellos und übertragen ihre Daten über digital codierten Funk mit einer Sendefrequenz von 868 MHz. Herstellerangaben zufolge haben die Fahrradsensoren eine Reichweite von 2 m und der Herzfrequenzmesser 10 m.
Der bis zu 30 m Tiefe wasserdichte HAC5 wird von einer Knopfbatterie, welche der Nutzer selbstständig austauschen kann, mit Strom versorgt. Durch Drehen des Computers kann dieser aus seinem Lenkerhalter gelöst werden und beispielsweise mit dem beiliegenden Armband als Uhr getragen werden. Ohne Armband wiegt der HAC5 etwa 51 g, mit ca. 78 g.
Die Bedienung erfolgt mit 6 Drucktasten, die um das 5-zeilige, runde Display mit einem Durchmesser von 3,2 cm verteilt angeordnet sind. Im Optionsmenü lassen sich zahlreiche Einstellungen vornehmen. Es existieren 5 Benutzerprofile (davon 2 Fahrradprofile), welche nur die Anzeigen aktivieren, welche bei der jeweiligen Sportart erwünscht werden. Die Voreinstellungen lassen sich auch manuell verändern.
Die Anzeigegenauigkeit beträgt bezüglich der Geschwindigkeit 0,1 km/h und für die zurückgelegten Distanzen 0,01 km.
Während des Trainings können bis zu 120 Stunden Daten aufgezeichnet werden. Ist der Speicher voll, so werden die ältesten wieder überschrieben. Die Aufzeichnung erfolgt je nach Einstellung in 2, 5, 10 oder 20 Sekunden-Intervallen. Registriert werden dabei Zeit, Strecke, Höhe, Geschwindigkeit, Puls, Temperatur, Steigung (%) und Trittfrequenz. Über ein 1,64 m langes USB-Kabel lassen sich die Ergebnisse von der Uhr auf den PC übertragen und dort mit Hilfe der beiliegenden Software (CicloTour (Bild) und CicloTrainer) auswerten und analysieren. Während CicloTour viele Möglichkeiten zur Analyse von absolvierten Touren ermöglicht, dient das Programm CicloTrainer der Trainingsauswertung. Die Software bietet zusätzlich einige Werkzeuge wie beispielsweise einen BMI-Berechner, einen Herzzonenkalkulator und Bergsteigungskalkulator.



Um den HAC5 auch bei anderen Spotarten einsetzen zu können, lässt sich optional der radarbasierte, eigenständig nutzbare Sensor RDS II erwerben. Mit ihm lassen sich bei vielen Sportarten (z.B. Laufen, Inlineskaten oder Skifahren) Geschwindigkeiten und zurückgelegte Distanzen ermitteln und anzeigen. Das 53,6 x 57,2 x 39,8 mm große und 67 g schwere Gerät wird mit einer Tragetasche mit Gürtelschnalle und einem insgesamt 97 seitigen Handbuch ausgeliefert, von denen 15 Seiten Deutsch sind. Das Messprinzip ist im Abschnitt 2.3.4 dargestellt. Anhand des Dopplereffekts wird mit Radarstrahlung die Relativgeschwindigkeit zwischen Sender und reflektierendem Boden ermittelt. Unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit über eine gewisse Zeit errechnet sich die zurückgelegte Distanz. Der Sensor überträgt seine Daten ebenfalls über Funk an den HAC5, besitzt aber auch ein eigenes kleines Display, auf dem 17 Funktionen angezeigt werden können. Zusätzlich lässt sich der RDS auf einen von vier Geschwindigkeitsbereichen (anwendbar von 1-99 km/h) einstellen. Die Darstellungsgenauigkeit beträgt 0,1 km/h bei der Geschwindigkeitsanzeige und 0,01 km für die Strecken. Eine AAA-Batterie versorgt ihn mit der nötigen Energie.

4.5.2 Bedienung

Die Bedienung des HAC5 ist auf Grund der vielen Funktionen und Einstellungsmöglichkeiten ohne Handbuch recht kompliziert. Es empfiehlt sich in diesem Fall besonders, dieses tatsächlich auch erst durchzuarbeiten. Von den insgesamt 38 Seiten werden auf 28 Seiten verschiedene Tastenkombinationen dargestellt und kurz erläutert. 6 Druckknöpfe bilden die Grundlage der Steuerung. Diese haben allerdings je nach Zeitdauer des Drucks unterschiedliche Bedeutungen. Eine Aufzeichnung beispielsweise lässt sich nur starten, wenn die beiden linken Knöpfe gleichzeitig für mindestens drei Sekunden gehalten werden. Für eine wichtige Funktion wie das Aufnehmen ist das im Vergleich zu anderen Geräten sehr umständlich. Zudem kam es im Test bei bestimmten Tasten vermutlich zu Kontaktproblemen, was dazu führte, dass Tastendrücke immer wieder ohne erkennbare Reaktion der Uhr verblieben.

Beim Starten einer Aufnahme wird automatisch nach aktivierten Sensoren (RDS, Fahrradsensoren oder Brustgurt) gesucht. Diese können ebenfalls im Optionsmenü manuell aktiviert werden.
Die Montage der Fahrradsensoren lässt sich mit den beiliegenden Hilfsmitteln leicht durchführen, wobei auf einen maximalen Abstand von 3 mm zwischen Sensor und Magnet geachtet werden muss.
Bei Verwendung des RDS fällt ein hoher Energieverbrauch auf. Den Herstellerangaben zufolge beträgt die Laufzeit mit einer Batterie zwischen 35 Stunden im Geschwindigkeitsmodus 4 und 50 Stunden im Modus 1. Während der Tests deutete das Batterie-Symbol auf dem Display wesentlich früher auf eine leere Batterie hin. Davon abgesehen sollte das RDS für eine genauere Distanzermittlung auf einer bekannten

Strecke kalibriert werden, was Aufwand und Zeit erfordert. Die Bedienung des kleinen Gerätes ist mit drei Knöpfen hingegen recht einfach.
Zum Übertragen der gespeicherten Daten auf den PC wird der HAC5 aus seiner Halterung genommen und über eine Klemme mit dem USB-Kabel verbunden. Der Radcomputer muss sich dabei im Übertragungsmodus befinden. Nach dem Öffnen der Software können die gespeicherten Ergebnisse eingeladen werden. Da eine Speichergröße von 120 Stunden zur Verfügung steht und bei jedem Anschluss an den PC von Neuem alle auf dem HAC5 aufgezeichneten Daten ausgelesen werden, dauert dieser Vorgang 2-3 Minuten. Die Auswertung lässt sich anschließend mit dem übersichtlichen Programm CicloTour (s.o.) vornehmen.

4.5.3 Tragekomfort

Der HAC kann entweder als Fahrradcomputer an einer Lenkerhalterung befestigt oder als Armbanduhr am Handgelenk getragen werden. Das Armband passt sich dem Armumfang an und gewährleistet einen stabilen Sitz des Sportcomputers. Durch seine Größe und das Gewicht von 78 g könnte er einigen Sportlern u.U. zu massig sein.
Der Brustgurt für die Herzfrequenzmessung schmiegt sich gut an und verrutscht nicht während der sportlichen Betätigung. Er ist für einen Oberkörperumfang von ca. 63 – 86 cm ausgelegt und weist ein Gewicht von 74 g auf.
Für die Distanz- und Geschwindigkeitsermittlungen bei anderen Sportarten neben dem Fahrradfahren wird das RDS-Gerät mit einer Tragetasche ausgeliefert. Die Tasche kann an einem Gürtel befestigt werden oder der Sensor wird mit der angebrachten Klemme direkt am Hosenbund befestigt. Mit 67 g ist er recht leicht und wird kaum wahrgenommen, durch die Anbringung kommt es beim Laufen jedoch zu starken Erschütterungen des Gerätes.

4.5.4 Messprinzip Radar

Teststrecke 1.0 (optimale Bedingungen)

Laut Ciclosport lassen sich mit dem RDS Genauigkeiten von i.d.R. ± 1 % erzielen. Für die Tests wurde der Geschwindigkeitssensor auf einer 1000 m langen Strecke kalibriert. Da das Gerät genau diese Distanz anzeigte, ist der daraus abgeleitete Kalibrierungsmaßstabsfaktor 1 und hat folglich keine Auswirkungen auf die Testergebnisse.

Die Kombination aus Ciclosports HAC5 und dem RDS II wurde zunächst unter optimalen Bedingungen auf Teststrecke 1.0 einer Genauigkeitsuntersuchung unterzogen. Der feste und flache Untergrund aus Teer stellt einen typischen Lauf auf einer Straße dar. Ein geringer Höhenunterschied von nur 1-2 m über die gesamte Distanz von 500 m und die gerade Strecke ohne Kurven ermöglichen einen Test unter Referenzbedingungen, da eine große Anzahl von Störeinflüssen auf diese Weise unterdrückt wird. Die am Ziel auf der Uhr angezeigten Strecken sind in folgender Grafik veranschaulicht:

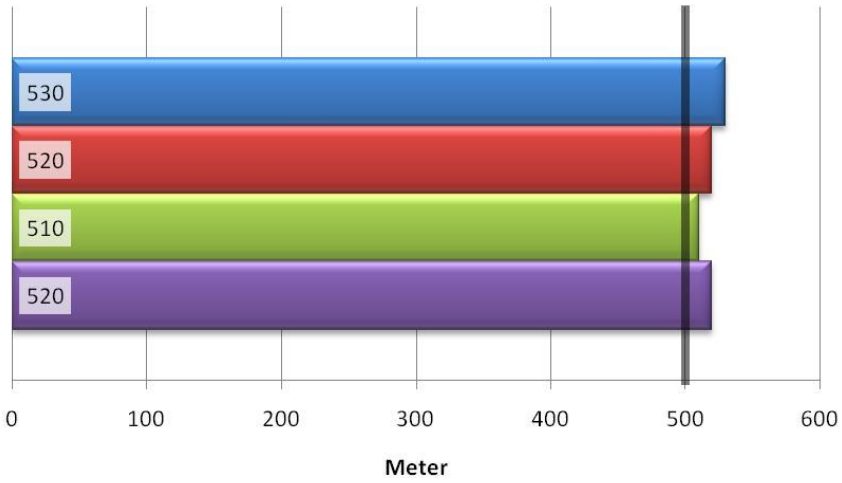


Abbildung 256: Teststrecke 1.0 - angezeigte Strecken (Sollstrecke 500 m)

Es ist auffällig, dass alle Distanzen 10 - 30 m zu lang angezeigt werden. Der Mittelwert der vier Messungen beträgt 513,25 m mit einer Standardabweichung von 8,3 m. Dies entspricht einer mittleren Abweichung von 2,65 % und im schlechtesten Falle 6 % bei der 530 m langen Distanz.
Die Anzeige- und Aufzeichnungsgenauigkeit des HAC5 ist bei Geschwindigkeiten auf 0,1 km/h und bei Strecken auf 0,01 km (10 Meter) beschränkt. In der folgenden Darstellung ist ein Vergleich zwischen den angezeigten und abgespeicherten Strecken zu sehen.

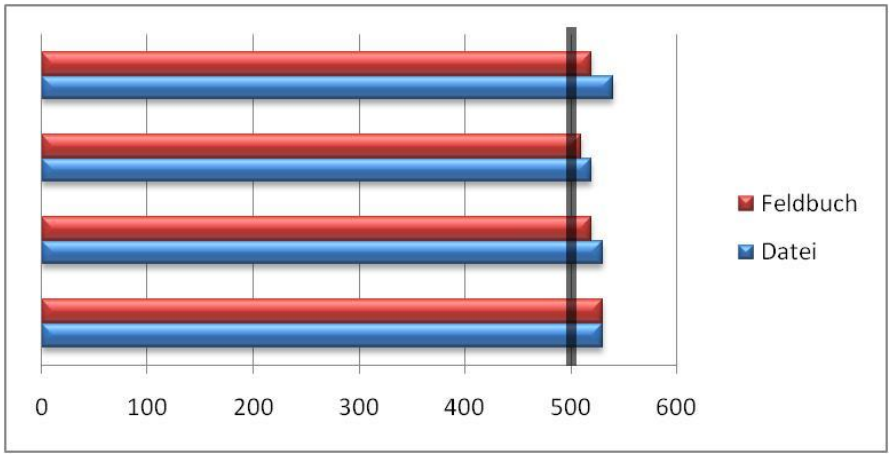


Abbildung 257: Teststrecke 1.0 – Vergleich angezeigte und aufgezeichnete Strecken

Der Abbildung kann entnommen werden, dass die in den Dateien registrierten Streckenlängen immer größer und einmal gleich der angezeigten Werte sind. Bei diesem Test ergibt der Mittelwert aus den abgespeicherten Distanzen 530 m und liegt 17 m über dem der ausgegebenen Strecken.
Da bei beiden Methoden die gleiche Darstellungsgenauigkeit verwendet wird, sollten sich die Wertepaare bei einer zeitgleichen Ausgabe nicht unterscheiden. Die hier vorliegende Situation deutet darauf hin, dass die Daten zuerst gespeichert werden und dann leicht verzögert auf dem Display der HAC5 erscheinen.

Die Strecken werden anhand der mit dem RDS ermittelten Geschwindigkeiten errechnet. Diese bilden dementsprechend die Grundlage für eine genaue Distanzmessung. Treten während des Laufs Aussetzer auf oder werden falsche Geschwindigkeiten registriert, so wirken sich diese Fehler unmittelbar auf die Distanzen aus. Eine lückenlose und genaue Geschwindigkeitserfassung ist folglich die Voraussetzung für eine präzise Streckenmessung. In Abbildung 258 ist ein Geschwindigkeitsverlauf von Teststrecke 1.0 dargestellt.

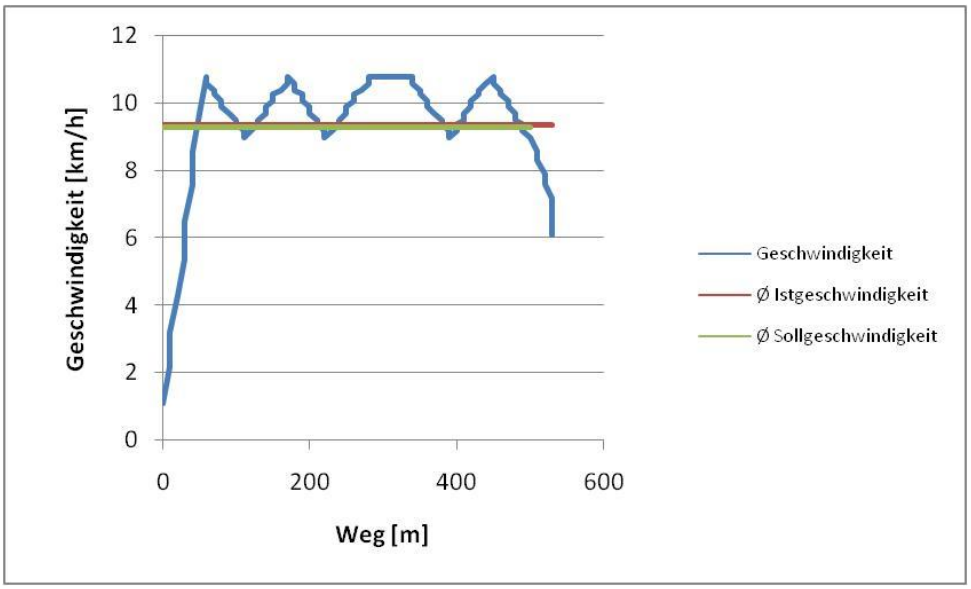


Abbildung 258: Teststrecke 1.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Nach dem Start bewegt sich die Geschwindigkeit in einem Bereich von etwa 9 - 11 km/h. Während aller Testdurchführungen wurde auf eine möglichst konstante Geschwindigkeit geachtet. Geht man davon aus, dass ein Tempo auf ca. ± 1 km/h gleichbleibend gehalten werden kann (dies entspricht 0,28 m/s und somit einer Variation der Schrittlänge von ungefähr 30 cm pro Sekunde; größere Abweichungen sollten vom Läufer registriert und korrigiert werden können), so befindet sich der Geschwindigkeitsverlauf im Rahmen der Genauigkeit des gleichmäßigen Laufens.
Auffällig ist die recht regelmäßige Abfolge von Geschwindigkeitsminima und -Maxima. Es ist unwahrscheinlich, dass die Geschwindigkeit ständig gesteigert und kurz darauf wieder verlangsamt wurde, daher ist die Ursache mit hoher Wahrscheinlichkeit beim HAC5 zu suchen. Wie sich noch zeigen wird, stellt das kontinuierliche Alternieren der Geschwindigkeitskurve einen typischen Verlauf für diesen Computer dar. Bei genaueren Untersuchungen der Schwankungen stellt sich, wie in Abbildung 259 zu sehen ist, heraus, dass die Extrempunkte in einem festen Abstand von 20 Sekunden auftreten. Es handelt sich um denselben Geschwindigkeitslauf, der nun gegen die Zeit abgetragen ist und maßstäblich verändert wurde.

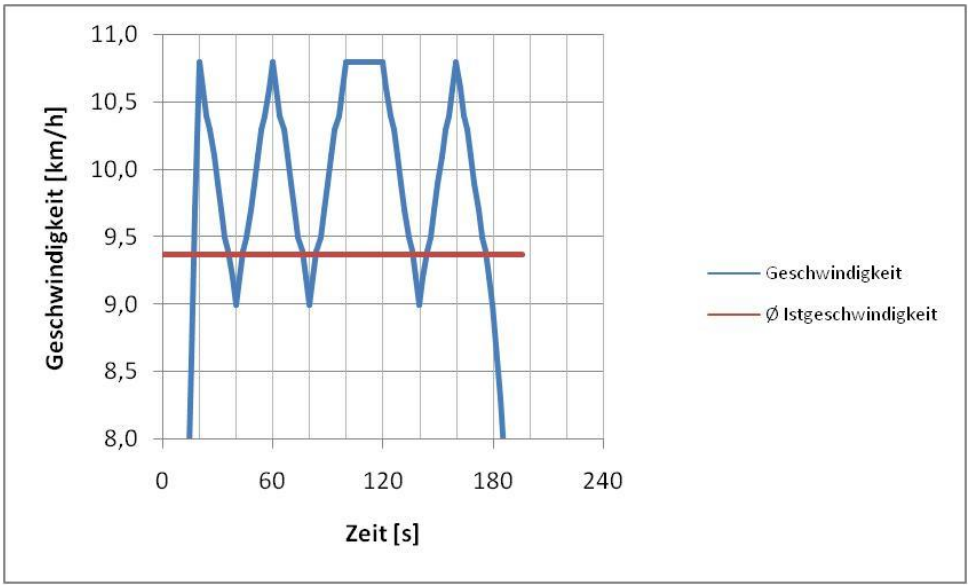


Abbildung 259: Teststrecke 1.0 – Geschwindigkeitskurve im zeitlichen Verlauf

Der Darstellung ist zu entnehmen, dass die Geschwindigkeit nach dem Starten der Aufzeichnung mit einem 2-sekündigen Speicherintervall zu jedem Vielfachen von 20 Sekunden einen Extremwert aufweist. Dabei wechseln sich Hoch- und Tiefpunkte bei der Geschwindigkeit ab. Einzige Ausnahme ist der Bereich zwischen 100 und 120 s, bei dem zwei Hochwerte aufeinander folgen. Des Weiteren stellt sich mit 10,8 km/h für die Maxima und 9,0 km/h bei den Tiefpunkten jedes Mal dasselbe Geschwindigkeitsniveau ein. Tiefergehende Analysen der gespeicherten Werte führen zu der Erkenntnis, dass neben der zeitlichen Komponente auch die gelaufene Distanz von Bedeutung ist. In den 20 s vor einem Geschwindigkeitshochwert wurden jeweils 60 m Strecke aufgenommen, bei Tiefwerten hingegen nur 50 m. Die Art der Extremwerte ist somit abhängig von der Länge des Streckenstücks im zurückliegenden 20-Sekunden-Intervall. Anhand dieser Begründung lassen sich auch die beiden Geschwindigkeitsmaxima bei 100 und 120 s erklären, da hierbei jeweils 60 m und nicht, wie sonst üblich, abwechselnd 60 und 50 m

verzeichnet wurden. Das regelmäßige Alternieren beschreibt demzufolge eine gleichförmige tatsächliche Laufgeschwindigkeit, während im eben beschriebenen Abschnitt 10 m mehr aufgezeichnet wurden und somit die Geschwindigkeit leicht erhöht war.

Hervorgerufen wird das auffällige Verhaltensmuster durch den verwendeten Speicheralgorithmus des HAC. Strecken besitzen nur eine Aufzeichnungsgenauigkeit auf volle 10 m, wodurch größere Distanzsprünge hervorgerufen werden als etwa bei einer 1 m genauen Aufzeichnung. Abhängig von der Geschwindigkeit ergeben sich demzufolge sowohl zeitliche als auch streckenbezogene Intervalle zwischen den Distanzänderungen, welche als Knickpunkte im Diagramm aufgetreten.

Ein 20-sekündiges Intervall bedeutet, dass 10 m in 20 s zurückgelegt wurden. Dies entspricht einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s bzw. 1,8 km/h.

In allen Abbildungen sind die Messergebnisse nur zur Veranschaulichung mit einer durchgängigen Linie verbunden, es handelt sich grundsätzlich um diskrete und keine kontinuierlichen Datensätze. Betrachtet man den durch diskrete Punkte dargestellten selben Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 260, so wird ersichtlich, dass zwischen den Knickpunkten je nach eingestelltem Aufzeichnungsintervall des Sportcomputers die fehlenden Zwischenwerte linear interpoliert werden.

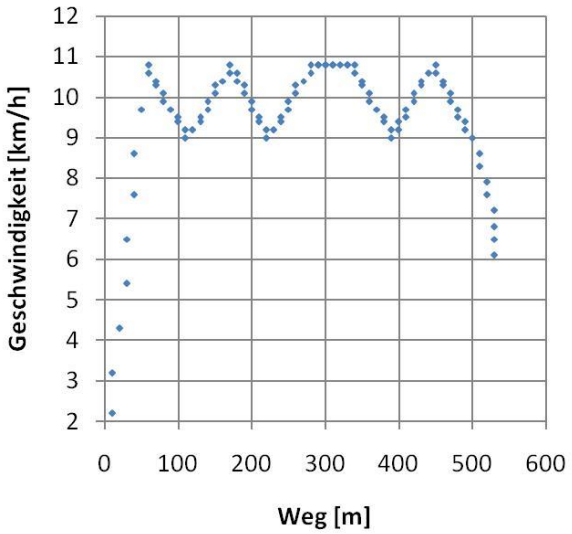


Abbildung 260: diskrete Punkte des Geschwindigkeitsverlaufs

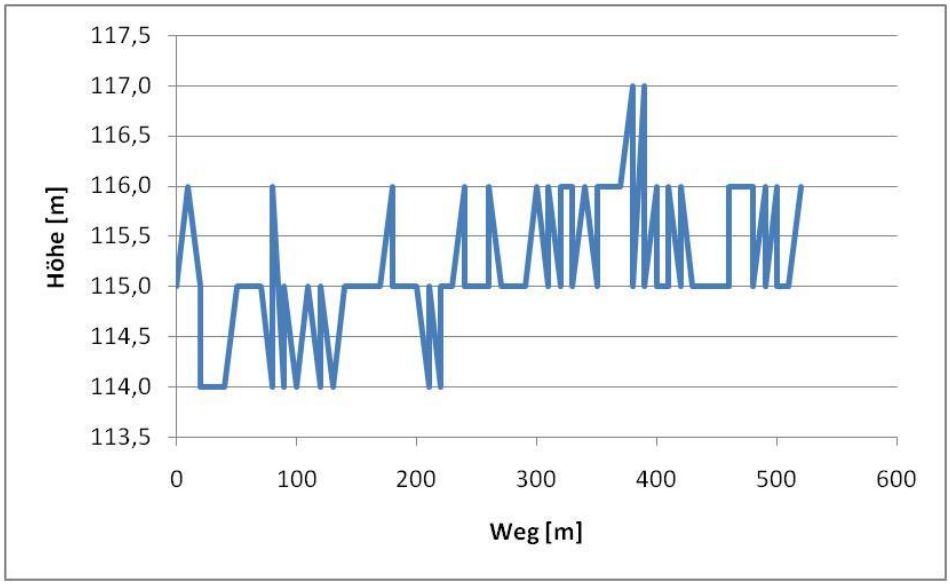


Abbildung 261: Teststrecke 1.0 - Höhenverlauf

In Abbildung 261 ist der aufgezeichnete Höhenverlauf der Teststrecke dargestellt. Die relativen Höhen werden nach dem Prinzip der barometrischen Höhenmessung ermittelt, wobei die Darstellungs- und Speichergenauigkeit 1 m beträgt. Für den absoluten Höhenbezug muss das Gerät auf einem Punkt bekannter Höhe geeicht werden.
Auch das Höhenprofil weist häufige, messgenauigkeitsbedingte Schwankungen auf, beschreibt den grundsätzlichen Höhenverlauf jedoch ordnungsgemäß. Die zum Teil schrägen oder senkrechten Verbindungslinien lassen sich auf die Abbildungsmethode dieses Diagramms zurückführen, da die Höhe gegen den Weg aufgetragen ist. Wegen der Speichergenauigkeit von Strecken auf 10 m werden u.U. mehrerer Höhen einem Wegpunkt (mit gleicher Distanz) zugeordnet.

Teststrecke 2.1 (optimale Bedingungen, längere Strecke)

Nahezu ideale Bedingungen herrschten auch auf Teststrecke 2.1. Die 1000 m lange Bahn hat wie Teststrecke 1.0 einen geraden Verlauf und einen Höhenunterschied von nur wenigen Metern. Neben der doppelt so langen Distanz besteht ein Unterschied im Untergrund. Anstelle des Teers wird hier ein Lauf auf mittelfestem bis festem Schotter durchgeführt. Andersartige Reflexionseigenschaften im Vergleich zu denen des Teers bei Teststrecke 1.0 können das Genauigkeitsverhalten der Geschwindigkeits- und Distanzermittlung leicht ändern. Die folgenden Strecken wurden dabei angezeigt:

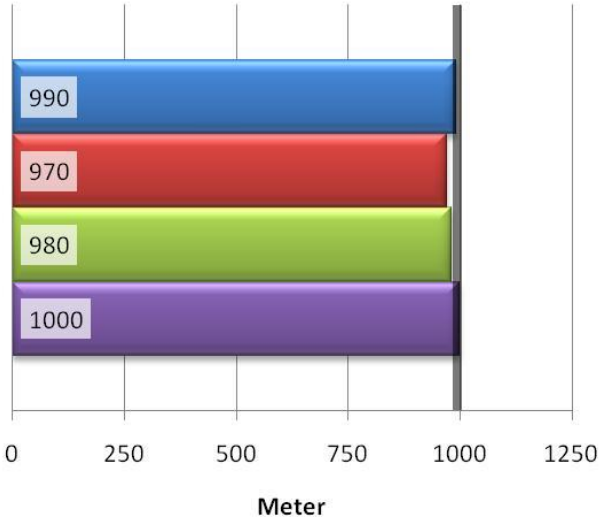


Abbildung 262: Teststrecke 2.1 - angezeigte Strecken

Auf den ersten Blick wird ersichtlich, dass die Genauigkeiten bei der 1000 m langen Strecke besser sind als bei der halb so langen Referenzstrecke. Sie befinden sich im Intervall von 97 – 100 %, während der Mittelwert von 985 m um 15 m bzw. 2,5 % von der Referenzdistanz abweicht. Es hat sich herausgestellt, dass die angezeigten Werte auf der HAC5 Sportuhr von denen auf dem Display des RDS Dargestellten meistens leicht differieren, wie in Abbildung 263 zu sehen ist.

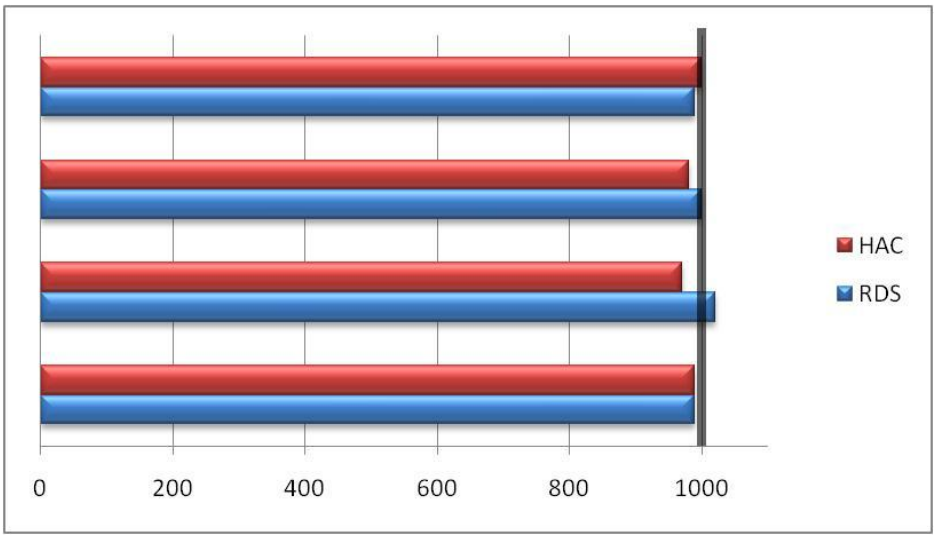


Abbildung 263: Teststrecke 2.1 - angezeigte Strecken von HAC und RDS

Der Mittelwert der auf dem RDS angezeigten Strecken beschreibt den Sollwert von 1000 m exakt (100 % Genauigkeit). Es kommt zu einer maximalen Abweichung von 20 m, was einer Abweichung von 2 % entspricht.

Die auftretenden Differenzen zwischen HAC5 und RDS mit maximal 50 m lassen entweder unterschiedliche interne Rechenalgorithmen oder eine schon beschriebene nicht kontinuierliche Übertragung der vom RDS ermittelten Werte zum HAC vermuten. In der folgenden Grafik ist zu sehen, dass sich die gespeicherten Daten und die vom HAC angezeigten Strecken sehr gut entsprechen, wobei die am RDS ausgegebenen Distanzen meistens etwas abweichen.

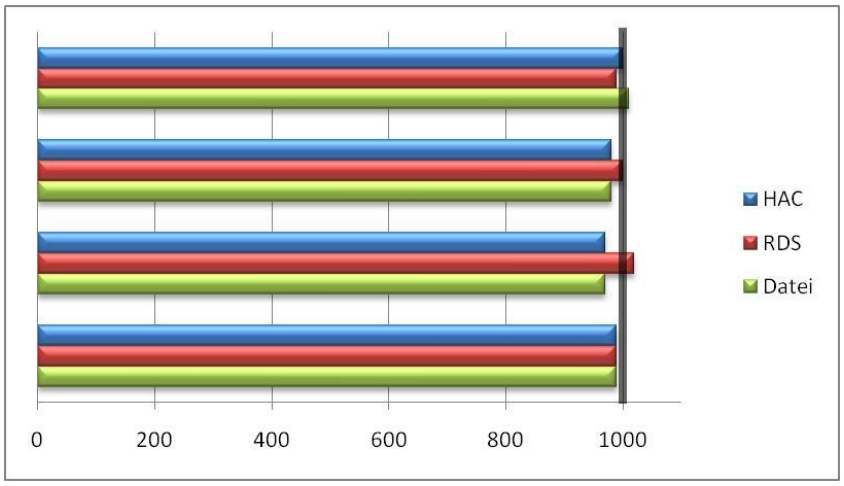


Abbildung 264: Teststrecke 2.1 - HAC-RDS-Datei-Vergleich

Der Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 265 zeigt ein sehr ähnliches Verhalten wie das bei Referenzstrecke 1 beschriebene. Es treten erneut abwechselnde Geschwindigkeitsextremwerte auf.

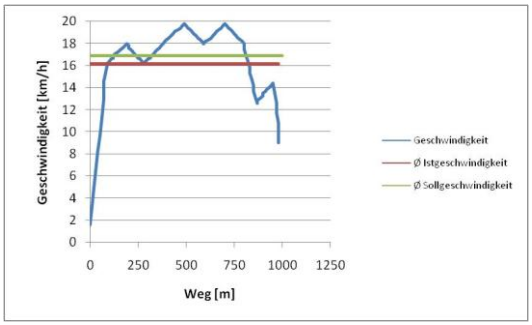


Abbildung 265: Teststrecke 2.1 – Geschwindigkeitsverlauf

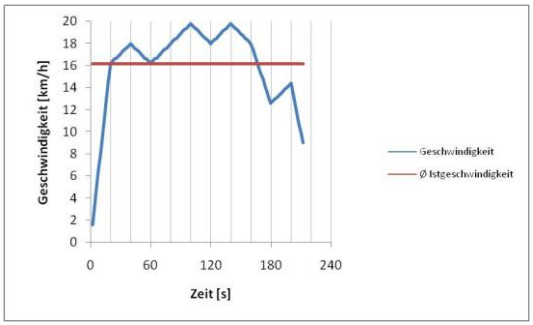


Abbildung 266: Teststrecke 2.1 - Geschwindigkeitskurve im zeitlichen Verlauf

Aus Abbildung 266 wird ersichtlich, dass die Wechselpunkte wieder bei ganzzahligen Vielfachen von 20 s nach Aufzeichnungsbeginn auftreten. Folglich handelt es sich um ein charakteristisches Verhalten des HAC. Die Geschwindigkeit ist bei dieser Messung weniger konstant, daher variieren die Extremwerte in Bezug auf ihr Niveau.

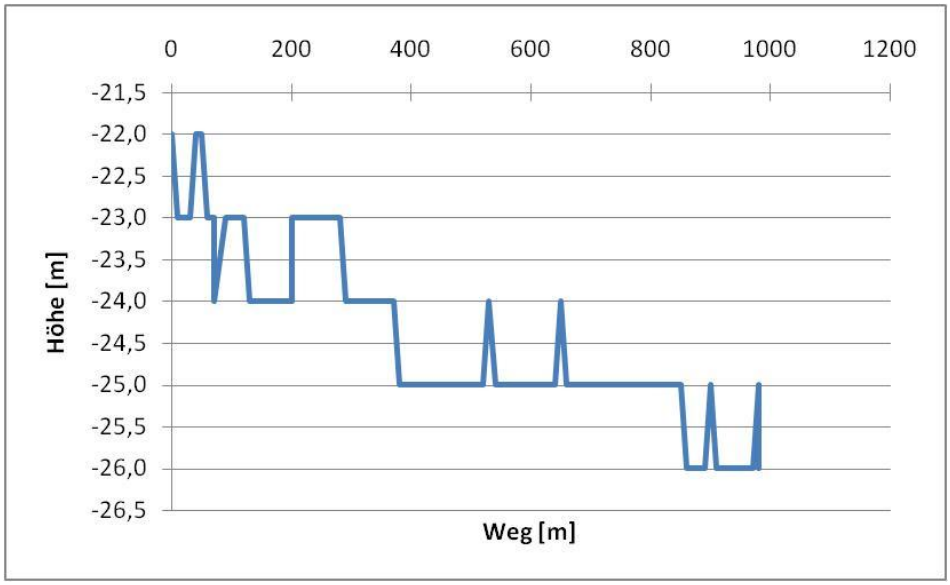


Abbildung 267: Teststrecke 2.1 - Höhenverlauf

Anhand des Höhenprofils in Abbildung 267 lässt sich anschaulich der Unterschied zwischen absoluten und relativen Höhen erläutern. Die 4 m Höhenvariation zwischen Anfangs- und Endpunkt beschreiben den Streckenverlauf korrekt. Der Test wurde in der Zeit eines anhaltenden Hochdruckgebietes an einem sonnigen und warmen Tag durchgeführt. Ohne Eichung des barometrischen Höhenmessers wird dementsprechend eine deutlich geringere Höhe angezeigt, da die Luftmassen einen höheren Druck auf das Barometer ausüben. Die Teststrecke befindet sich etwa 50 m über dem Meeresspiegel, die Höhenmessung hingegen führte zu Ergebnisse von ungefähr -25 m. Eine Variation des Luftdrucks hat in diesem Fall eine Höhenänderung von 75 m hervorgerufen.

Teststrecke 5.0 (bewegte Umgebung)

Die Geschwindigkeits- und Entfernungsmessung erfolgt über das RDS auf der Grundlage von Radarwellen. Primär wird die Relativgeschwindigkeit zwischen Sender (RDS) und reflektierender Umgebung (meistens Boden) ermittelt, indem Dopplerfrequenzverschiebungen ausgewertet werden. Bisher wurde auf ein unbewegtes Testumfeld geachtet, um Fehlereinflüsse bei der Genauigkeit ausschließen zu können.
Teststrecke 5.0 ist hingegen ausgelegt, die Auswirkungen von stark bewegter Umgebung festzustellen. Dazu wurde das Gerät einem Test auf einer geraden, 400 m langen Strecke am Maschsee unterzogen. Wegen eines Uferfestes herrschte reichlich Personenverkehr, welcher die Messungen potentiell hätte beeinflussen können.

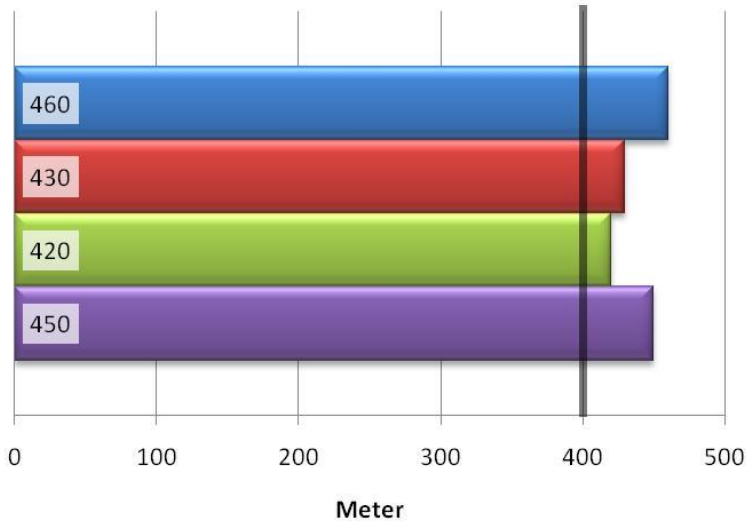


Abbildung 268: Teststrecke 5.0 - angezeigte Strecken

Die vom HAC angezeigten Ergebnisse entnehme man Abbildung 268. Alle Messwerte liegen oberhalb der tatsächlichen Distanz von 400 m. Der Mittelwert beträgt 440 m mit einer Standardabweichung von 18,3 m. Bei einer bewegten Umgebung werden deutlich zu große Strecken ermittelt, folglich resultieren starke Abweichungen von mittleren 10 % und maximal 15 % in Bezug auf die Sollstrecke.
Erstmals zeigt sich bei den drei unterschiedlich ausgegebenen Distanzen von HAC5, RDS und der Datei ein einheitliches Bild, da alle dieselben Werte darstellen (Abbildung 269).

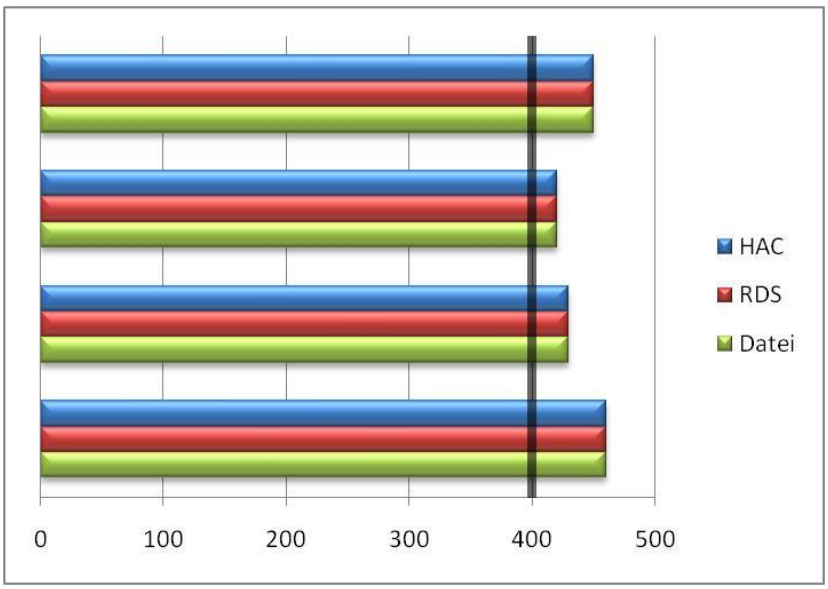


Abbildung 269: Teststrecke 5.0 - HAC-RDS-Datei-Vergleich

Die kurze Anzeigeverzögerung scheint also mit der zurückgelegten Entfernung zu korrelieren. Abhängig vom aktuellen Streckenwert beim Beenden des Aufzeichnungsvorgangs können Abweichungen hervorgerufen werden. Die Ursache beruht in der Anzeige- bzw. Speichergenauigkeit auf 10 m des HAC5. Wird die Aufnahme nahe eines vollen 10-Meter-Wertes gestoppt, kommt es zu einer Übereinstimmung zwischen gespeicherter und dargestellter Distanz. Problematischer verhält es sich bei

den 5-Meter-Werten. Während in der Datei gerade der nächst höhere Zehnerwert registriert wird, führt die Anzeigeverzögerung des Displays noch zu einer Darstellung des kleineren Zehnerwertes. Offensichtlich kam es bei den vier Messungen nur zu eindeutigen Ergebnissen.

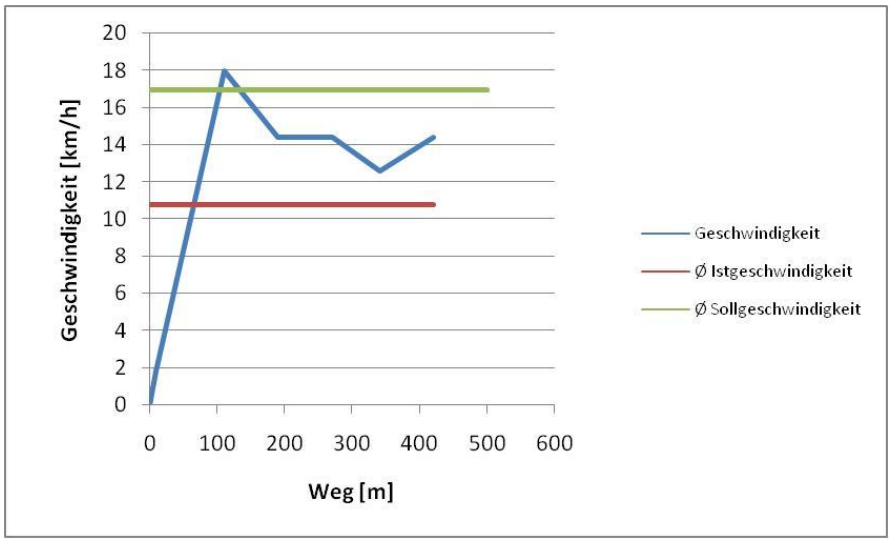


Abbildung 270: Teststrecke 5.0 - Geschwindigkeitsverlauf

Die hohen Abweichungen der Streckenmessungen im Vergleich zum Sollwert von 400 m lassen sich anhand des Geschwindigkeitsverlaufes in Abbildung 270 erläutern. Bewegte Umgebung führt dazu, dass die Radarwellen unterschiedlich reflektiert werden. Verringert sich der Abstand zwischen dem Sender RDS und anderen Objekten (z.B. durch entgegenkommende Personen), wird eine scheinbar höhere Geschwindigkeit registriert. Das Vorbeilaufen an gehenden Menschen führt folglich immer - bei einem in Laufrichtung ausgerichteten RDS - zu Abstandsverkleinerungen. Aus diesem Grund lassen sich die bis zu 18 km/h hohen Geschwindigkeiten (Abbildung 270) erklären.
Berechnungen der Strecke beruhen auf den wahrgenommenen Geschwindigkeiten und der Laufzeit (Geschwindigkeit x Zeit = Weg). Zu hohe Geschwindigkeiten verursachen somit zu lange Distanzen.
Der entsprechende Höhenverlauf (Abbildung 271) weist keine Besonderheiten auf.

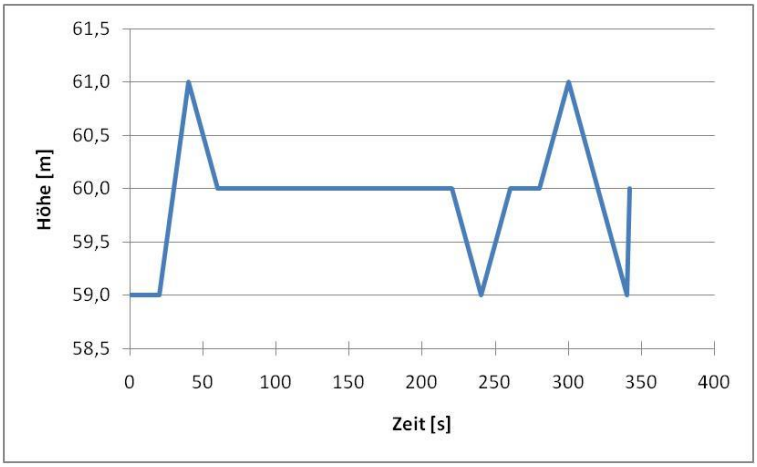


Abbildung 271: Teststrecke 5.0 - Höhenverlauf

Teststrecken 6.0 und 7.0 (unterschiedliche Untergründe)

Auf den beiden folgenden Teststrecken 6.0 und 7.0 werden die Verhaltensweisen des Gerätes in Bezug auf verschiedene Untergrundarten und damit verbundenen differierenden Reflexionseigenschaften untersucht. Teststrecke 6.0 stellt einen Lauf über Rasen dar, bei dem die Mikrowellen an Grashalmen diffus gebrochen werden. Zum Vergleich findet ein Testlauf (Teststrecke 7.0) auf einem Feldweg mit feinem Schotter statt, um Aussagen über die Auswirkungen der Untergrundtypen treffen zu können.

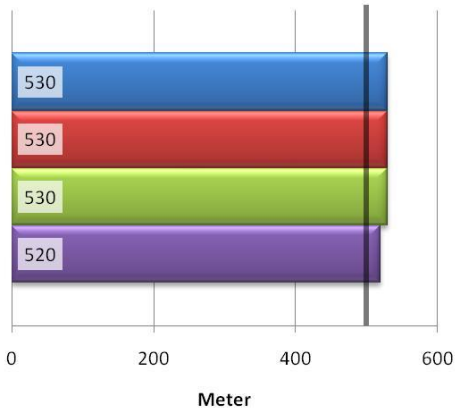


Abbildung 272: Teststrecke 6.0 (Rasen)

- angezeigte Strecken

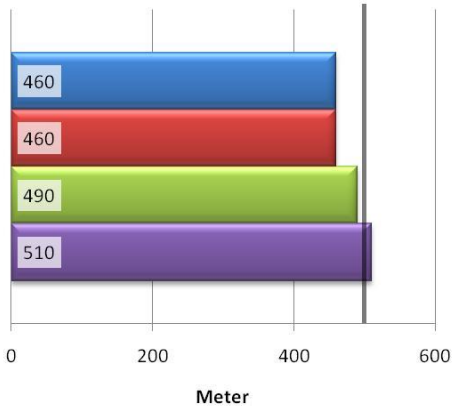


Abbildung 273: Teststrecke 7.0 (Schotter)

- angezeigte Strecken

In den beiden Abbildungen lassen sich die angezeigten Distanzen auf den Teststrecken 6.0 auf Rasen (Abbildung 272) und auf lockerem Schotter (Abbildung 273) mit einer Sollstrecke von jeweils 500 m erkennen. Der Mittelwert für den Rasen-Test beträgt 527,5 m (Standardabweichung nur 5 m), auf dem Feldweg hingegen 480,0 m mit 24,5 m Standardabweichung. Es lässt sich konstatieren, dass die Strecken auf einem diffus reflektierenden Untergrund größer angezeigt werden als auf einem Feldweg mit feinem Schotter. Die Abweichungen zur Sollstrecke auf Rasen fallen mit durchschnittlich 5,5 % bezogen auf den Mittelwert und 6 % im schlechtesten Fall ähnlich wie die mittleren 4 % bzw. maximal 8 % bei Teststrecke 7.0 aus.

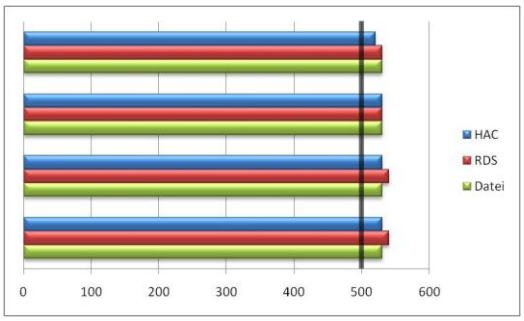


Abbildung 274: Teststrecke 6.0 (Rasen)

– HAC-RDS-Datei-Vergleich

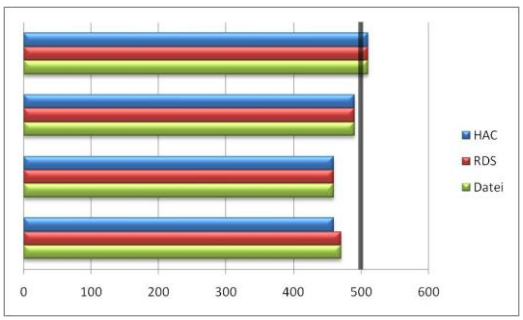


Abbildung 275: Teststrecke 7.0 (Schotter)

– HAC-RDS-Datei-Vergleich

Bei allen 8 Messungen auf den beiden Teststrecken entsprechen sich die angezeigten Werte von HAC und RDS sowie denen aus den Dateien sehr gut. In zwei Fällen kommt es

zu Unterschieden zwischen den Ausgabewerten des HAC und den gespeicherten Distanzwerten. Die Begründung ist bei Teststrecke 5.0 zu finden.

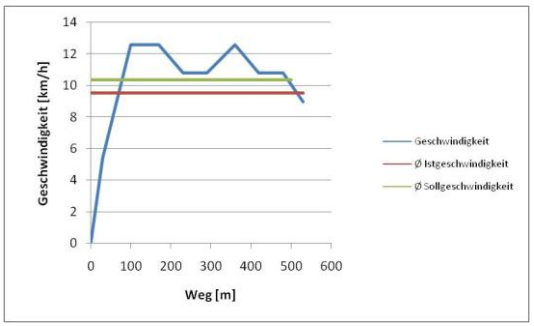


Abbildung 276: Teststrecke 6.0 (Rasen) - Geschwindigkeitsverlauf

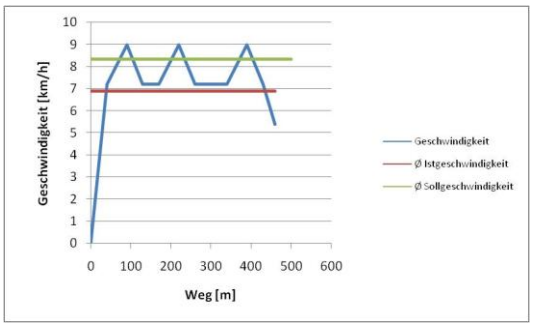


Abbildung 277: Teststrecke 7.0 (Schotter) - Geschwindigkeitsverlauf

Während des Tests wurden beide Strecken mit einer sehr ähnlichen Geschwindigkeit absolviert. Wie den beiden Diagrammen zu entnehmen ist, wurden dabei auf dem Rasen (Abbildung 276) eine um ca. 4 km/h höhere Geschwindigkeiten als auf dem Schotter (Abbildung 277) registriert. Begründen lässt sich das Phänomen, wie bereits angesprochen, mit den diffusen Reflexionseigenschaften der Wiese. Durch die unregelmäßige Struktur der Grashalme werden „Cluttersignale“ (Abschnitt 2.3.6) hervorgerufen, welche mit dem eigentlichen Echo Interferenzen bilden und zu einer verfälschten Geschwindigkeitsinformation führen. Wie bei Teststrecke 5.0 beschrieben, führen zu hohe wahrgenommene Geschwindigkeiten zu längeren Strecken.
Auf Teststrecke 7.0 verhält es sich genau entgegengesetzt. Die Reflexionseigenschaften des feinen Schotters verursachen eine zu geringe Geschwindigkeit und die errechneten Strecken werden im Vergleich zu dem tatsächlichen Verhältnis verkürzt.

Die beiden Teststrecken 6.0 und 7.0 verlaufen im Abstand von etwa 15 m parallel zueinander. Aufgrund des Geländes kann von ungefähr gleichen Höhenverläufen ausgegangen werden kann. Beide Profile beschreiben die etwa 4-5 m Höhenunterschied zwischen Anfangs- und Endpunkten korrekt.

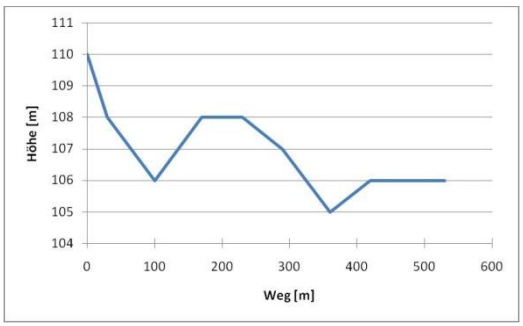


Abbildung 278: Teststrecke 6.0 (Rasen) - Höhenverlauf

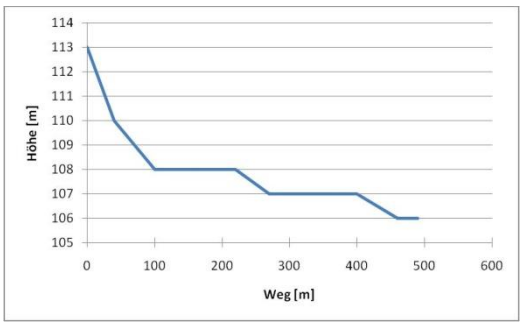


Abbildung 279: Teststrecke 7.0 (Schotter) - Höhenverlauf

Teststrecke 8.0 (kurviger Streckenverlauf)

Nachdem der Sportcomputer HAC5 mit dem Radar-Sensor bisher ausschließlich auf gerade verlaufenden Strecken getestet wurde, folgt mit Teststrecke 8.0 ein sehr kurvenreicher Weg. Besonders das Verhalten des RDS während der Kurven ist hierbei von Interesse.

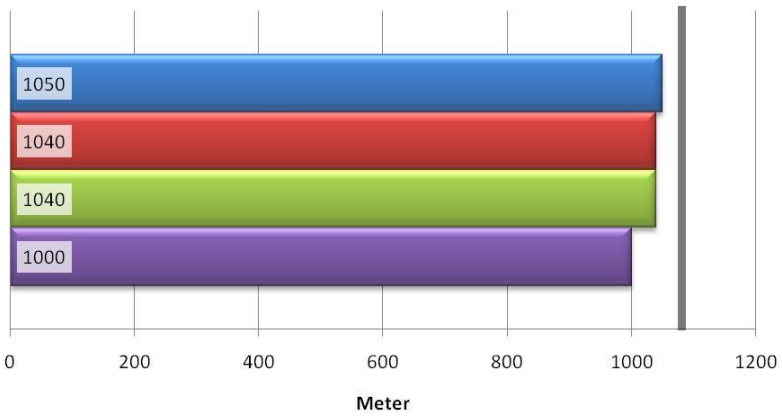


Abbildung 280: Teststrecke 8.0 - angezeigte Strecken

Abbildung 280 zeigt die angezeigten Streckenlängen nach einer zurückgelegten tatsächlichen Distanz von 1081,8 m. Es ist ersichtlich, dass alle Ergebnisse im Bereich zwischen 1000 und 1050 m deutlich unterhalb des geforderten Wertes liegen. Ausgedrückt als Streckengenauigkeiten bedeutet dies ein Intervall von 92,4 % bis 97,1 %. Für den Mittelwert ergibt sich 1032,5 m (Standardabweichung 22,2 m) bzw. 95,4 %.

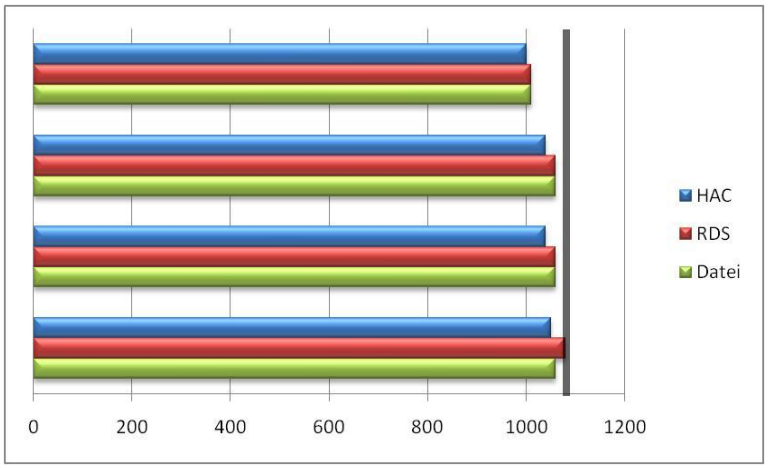


Abbildung 281: Teststrecke 8.0 – HAC-RDS-Datei-Vergleich

Werden die drei Streckenangaben von HAC, RDS und aus der Datei gegenüber gestellt, so zeigt sich, dass mit maximal 10 m großen Differenzen alle vier Messungen gut überein stimmen. Generell sind die HAC-Ausgabedistanzen immer kleiner bzw. gleich denen im aufgezeichneten Protokoll. Dies deutet auf das Zutreffen des Erklärungsmodells der kurzzeitig verzögerten Displayanzeige hin.

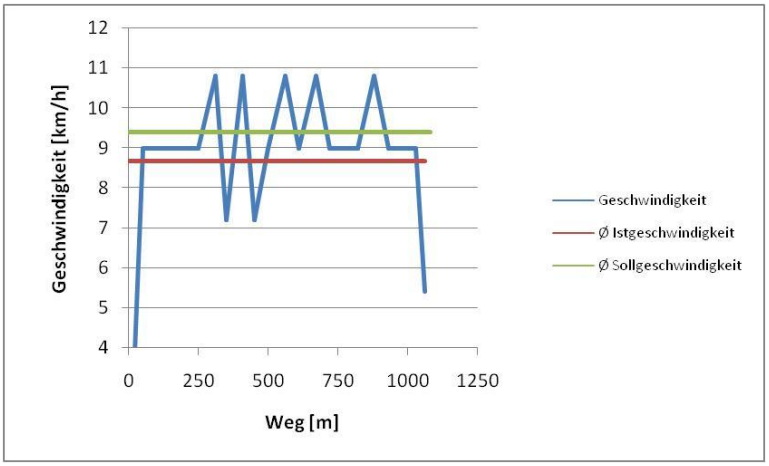


Abbildung 282: Teststrecke 8.0 - Geschwindigkeitsverlauf

Der Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 282 weist vor allem in Anfangsbereich einige Besonderheiten auf. Bis etwa 250 m fehlen die typischen Schwankungen. Es wurde eine konstante Geschwindigkeit von 9 km/h registriert.
Teststrecke 8.0 besteht aus verschiedenen Untergründen. Der besagte Bereich ist mit Pflastersteinen versehen. Vermutlich ist hier wegen besonderer Reflexionseigenschaften eine etwas zu geringe Geschwindigkeit ermittelt worden, welche zu den verkürzten Strecken (Abbildung 280) führt.

Der passende Höhenverlauf ist in Abbildung 283 veranschaulicht.

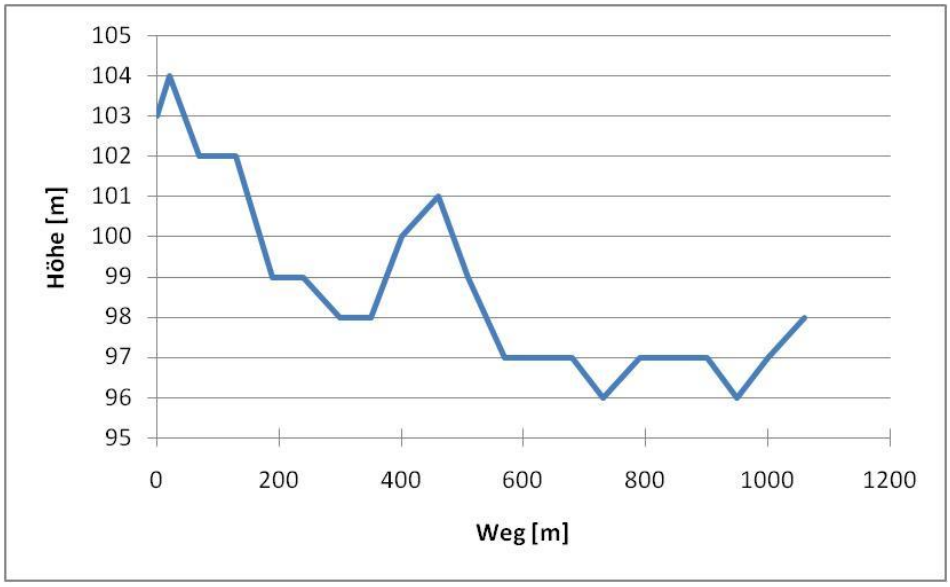


Abbildung 283: Teststrecke 8.0 - Höhenverlauf

Das Höhenprofil der Teststrecke wird recht genau gezeigt. Weite Teile der Strecke sind abfallend, während zwischen 350 m und 500 m der leichte Höhenanstieg in der Nähe des Ungarischen Pavillons im EXPO-Gelände treffend erkannt wurde.

Teststrecke 10.0 (verschiedene Tests)

Im Folgenden werden verschiedene Versuche auf Teststrecke 10.0 geschildert. Die Höhenverläufe werden nur abgebildet, wenn diese Besonderheiten aufweisen.

Ausrichtung seitlich und nach hinten

Herstellerangaben zufolge kann das RDS-Gerät in Laufrichtung nicht nur vorne, sondern auch hinten am Körper angebracht werden, allerdings nicht seitlich. Dieser Test soll zeigen, wie sich die unterschiedlichen Ausrichtungen auf die Streckengenauigkeit auswirken.

Ausrichtung hinten

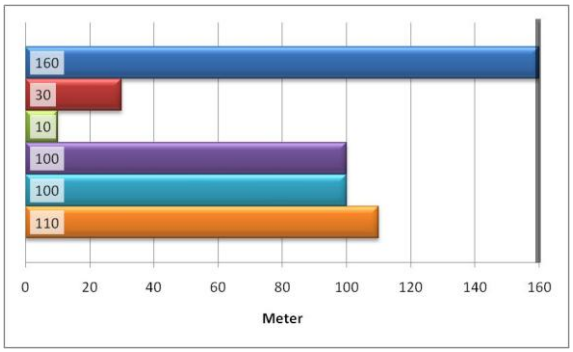


Abbildung 284: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken (Ausrichtung nach hinten)

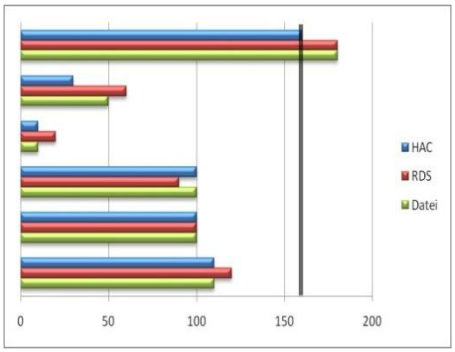


Abbildung 285: Teststrecke 10.0 – HAC-RDS-Datei-Vergleich (Ausrichtung nach hinten)

Wie in Abbildung 284 deutlich erkennbar ist, sind die Ergebnisse bei einer rückwärtigen Anbringung des RDS am Körper sehr heterogen. Das Verhalten spiegelt sich in der äußerst hohen Standardabweichung von 55 m des Mittelwerts mit 85 m wider. Wegen der hohen Streuung der Werte wurde der Test statt der üblichen vier Messungen sechsmal ausgeführt. Das Ergebnis zeigt, dass drei Messwerte bei ca. 100 m liegen, zwei mit Ausgaben von 10 und 30 m sehr kurz sind und einmal ein korrektes, dem Sollwert von 159 m entsprechendes Resultat auftritt.

Die Messgenauigkeiten der Strecke liegen zwischen 6 % im schlechtesten und 100 % im besten Fall. Der Mittelwert mit 85 m entspricht einer Genauigkeit von 53,3 %.

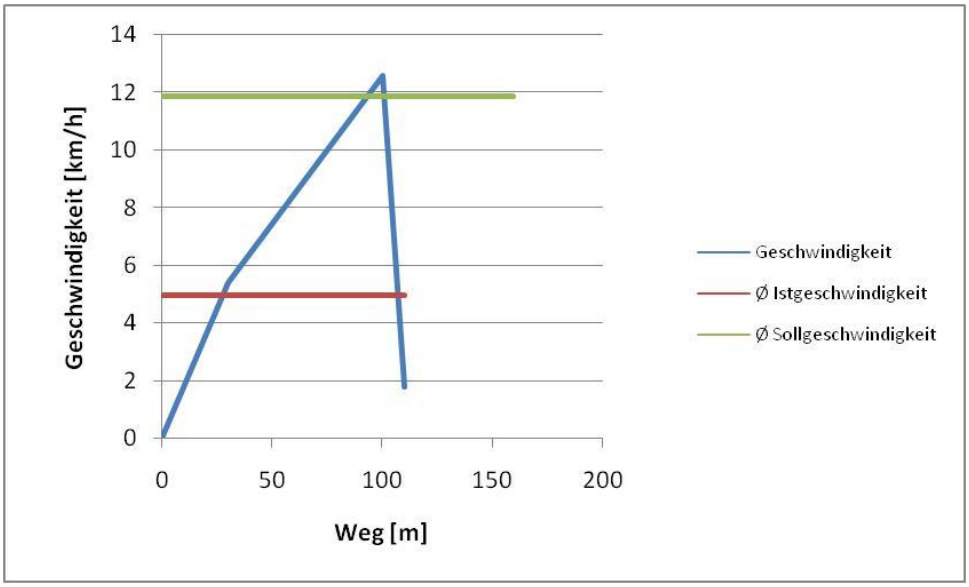


Abbildung 286: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf – Ausrichtung nach hinten

In Abbildung 286 ist einen typischer Geschwindigkeitsverlauf veranschaulicht. Da kontinuierlich (auch über die Zeit gesehen) Geschwindigkeiten registriert wurden und keine Aussetzer vorhanden sind, ist hier auf den ersten Blick kein Fehler ersichtlich, der die deutlich zu kurzen Strecken verursachen könnte. Die Ursache besteht in der fehlerhaften Wahrnehmung der Geschwindigkeit.

Ausrichtung seitlich

Eine Anbringung des RDS seitlich des Körpers führt zu folgenden Ergebnissen:

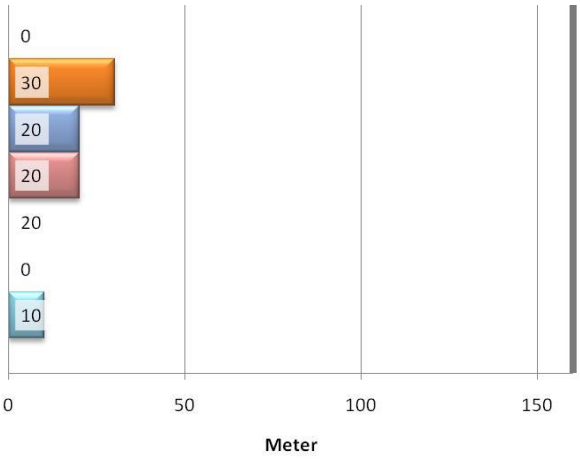


Abbildung 287: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken (Anbringungsort seitlich)

Wie aus Abbildung 287 ersichtlich wird, ist eine seitliche Ausrichtung für die Strecken- und Geschwindigkeitsermittlung ungeeignet. Die sieben Messungen führen zu einem Mittelwert von 15 m mit einer Standardabweichung von 12,2 m. Dies entspricht einer Streckengenauigkeit von nur 9,4 %.

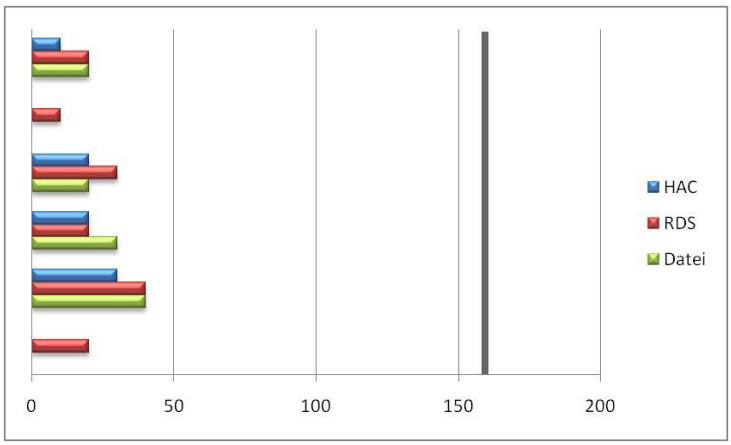


Abbildung 288: Teststrecke 10.0 - HAC-RDS-Datei-Vergleich

Der Vergleich zwischen den drei Ausgabemethoden der Strecken ergibt, dass der HAC häufig um 10 m geringere Distanzen ausgibt als in der Datei gespeichert sind. In zwei Messungen registriert das RDS-Gerät Distanzen, ohne dass diese auf dem Display des HAC oder in seinem Speicherungsprotokoll erscheinen. Wie üblich werden auf dem Sportcomputer keine größeren Werte als in der Datei verzeichnet sind, ausgegeben.

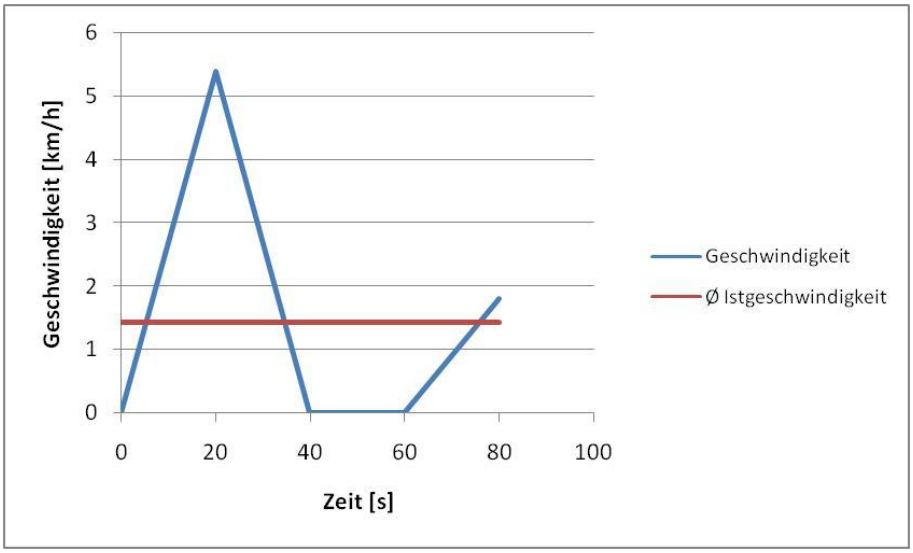


Abbildung 289: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitskurve in zeitlichen Verlauf - Ausrichtung seitlich

Anhand des Geschwindigkeitsverlaufes in Abhängigkeit der Zeit wird deutlich, weshalb wesentlich verkürzte Strecken ermittelt werden. Wie bereits des Öfteren beschrieben, wird alle 20 s ein Extrempunkt der Geschwindigkeit dargestellt. Während dieser Messung gelingt eine Geschwindigkeitsermittlung nur an zwei Stellen, dazwischen kann keine Bewegung festgestellt werden.

Das schlechte Verhalten des RDS bei einer seitlichen Anbringung lässt sich mit den Eigenschaften elektromagnetischer Wellen begründen. Das Messprinzip basiert auf Auswertungen von Dopplerfrequenzverschiebungen, welche durch Relativbewegungen verursacht werden. Bei einer Aussendung der Wellen rechtwinklig zur Bewegungsrichtung wird keine Frequenzverschiebung hervorgerufen, dementsprechend lassen sich auch keine Geschwindigkeiten feststellen. Mathematisch betrachtet wird der als Faktor wirkende Kosinus-Term in der Formel zur Dopplerfrequenzverschiebung (Formel 2-7) (und damit auch der ganze Ausdruck) zu Null.

Die wenigen, dennoch verzeichneten Geschwindigkeiten bei den Testläufen können mit leichten Schwankungen des RDS erklärt werden. Zwar wurde bei der Durchführung besonders darauf geachtet, das Gerät stabil und genau seitlich des Körpers zu halten, aber durch die Laufbewegung war eine geringe Erschütterung des Sensors unvermeidlich. Die Radarwellen wurden somit nicht kontinuierlich exakt im rechten Winkel ausgestrahlt, wodurch einige Geschwindigkeitswerte registriert werden konnten.

Plötzliches Anhalten

Neben dem Verhalten des Sensors während der Läufe ist auch seine Reaktion auf ein plötzliches Stehenbleiben von Interesse. Nach einem abrupten Anhalten bei einer Distanz von 110 m wurde dazu die angezeigte Strecke notiert. 30 Sekunden später kam es zu einer erneuten Ablesung des Wertes.

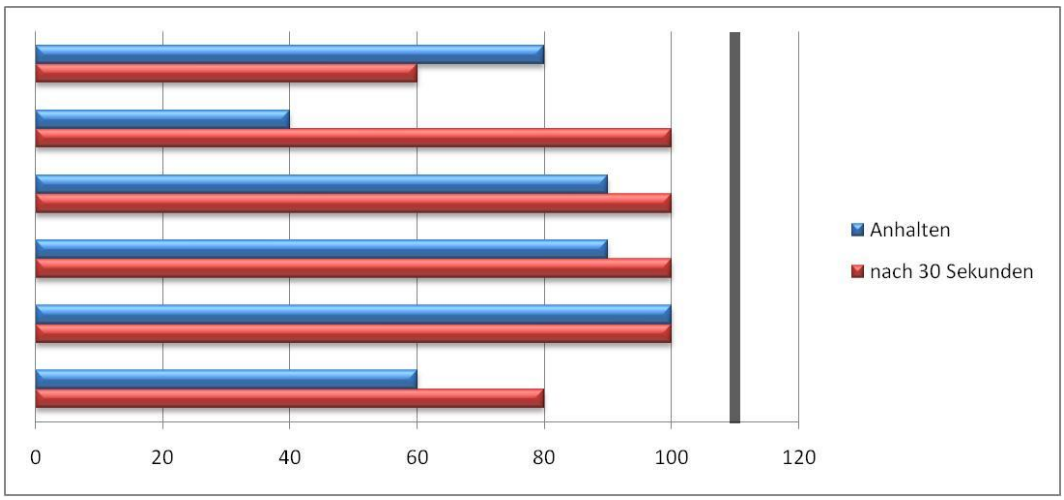


Abbildung 290: Teststrecke 10.0 - Plötzliches Anhalten (angezeigte Strecken HAC)

Anhand der ermittelten Daten lässt sich erkennen, dass sich die auf dem HAC angezeigten Strecken während der Pause von einer halben Minute trotz Stehenbleibens vergrößern bzw. in einem Fall verkleinern. Die maximale Veränderung umfasst dabei eine Größenordnung von 60 m, die anderen Wertepaare hingegen weisen Sprünge von 10 – 20 m auf. Nur bei einer Messung bleibt die angezeigte Distanz auch nach den 30 s unverändert. Nach dieser Zeit werden im Wesentlichen Strecken von 100 m angezeigt, also 10 m kürzer als der Sollwert 110 m.

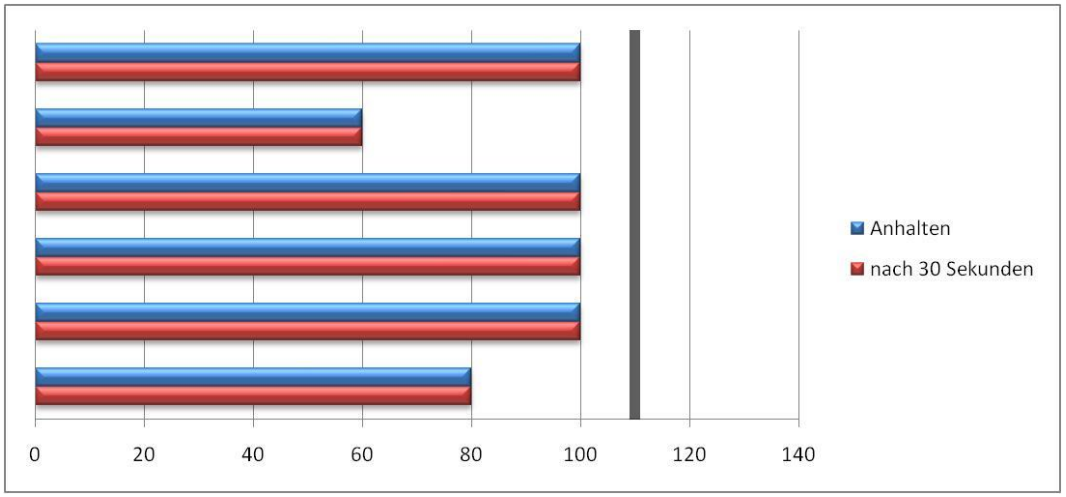


Abbildung 291: Teststrecke 10.0 - Plötzliches Anhalten (gespeicherte Strecken)

Bei Betrachtung der aufgezeichneten Strecken stellt sich heraus, dass sich diese nach dem Anhalten nicht verändern. Der Test bestätigt die Vermutung der Anzeigeverzögerung des HAC. Während die endgültigen Strecken in der Datei direkt beim Stehenbleiben endgültig gespeichert werden, benötigt der HAC noch einige Zeit, um dieselben Werte auf dem Display auszugeben.

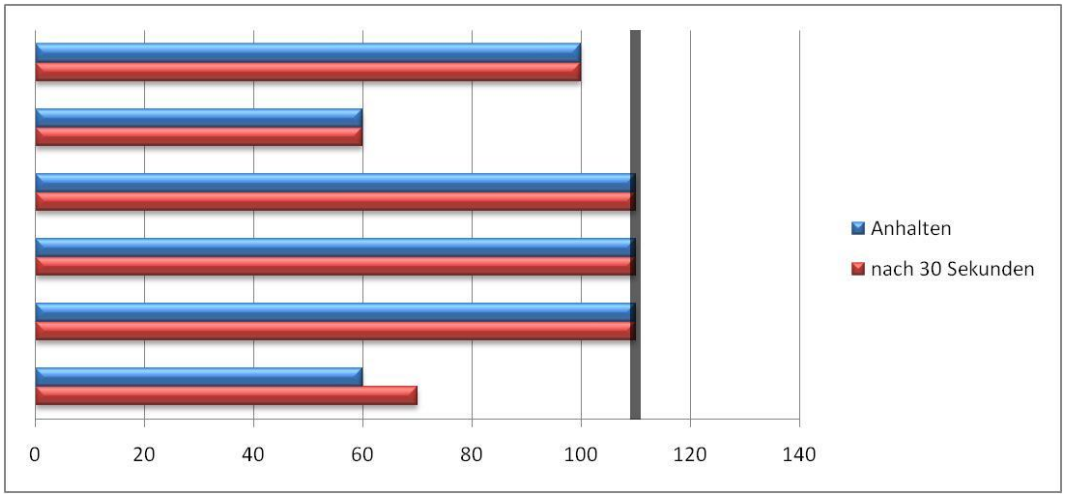


Abbildung 292: Teststrecke 10.0 - Plötzliches Anhalten (RDS)

Eine Auswertung der auf dem RDS angezeigten Werte zeigt ein ähnliches Verhalten wie bei den gespeicherten Strecken: Bis auf einen als Ausreißer betrachteten Fall kommt es zu keinen Veränderungen der Strecken nach Ablauf der Zeit. Weiterhin wird der Sollwert im Vergleich zu den anderen beiden Verfahren vom RDS am genausten erfasst. Eine Übertragungsverzögerung zwischen Sensor und HAC erscheint anhand dieser Testergebnisse sehr wahrscheinlich, da das Gerät höhere Werte anzeigt als die vom HAC Dargestellten.

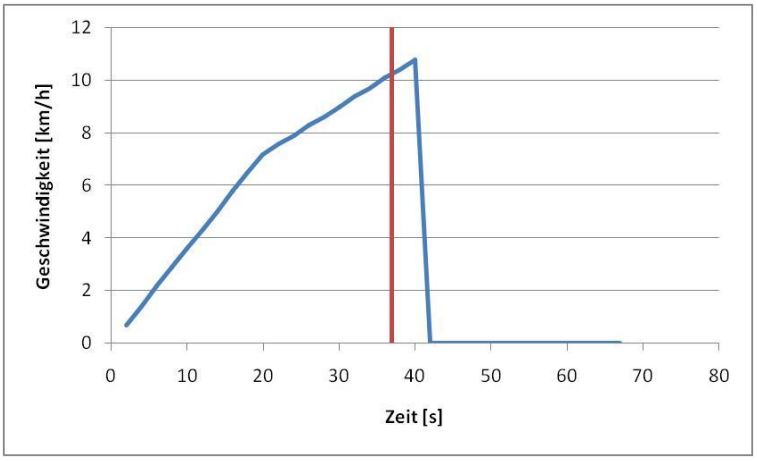


Abbildung 293: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf - Plötzliches Anhalten

Eine Untersuchung der Geschwindigkeit im zeitlichen Verlauf (Abbildung 293) zeigt, dass diese 3 s nach dem Anhalten auf Null abfällt. Das Gerät reagiert damit sehr schnell auf die plötzliche Geschwindigkeitsänderung.

Eine Einschränkung hinsichtlich der Aussagekraft dieser Abbildung muss allerdings bedacht werden: Auch hier verläuft die Geschwindigkeit in linearer Form zwischen den Knickpunkten bei jeden vollen 20 Sekunden. Bei 37 s, dem Zeitpunkt des Anhaltens, steigt die Geschwindigkeit zunächst weiter bis zum nächsten Wert bei 40 s. Erst dort zeigt der abrupt geänderte Bewegungsablauf Auswirkungen, indem innerhalb eines Speicherintervalls von 2 s die Geschwindigkeit auf Null sinkt. Es besteht folglich die Möglichkeit, dass die Änderung bereits früher registriert wird, aber durch die vermutliche lineare Interpolation im 20-Sekunden-Intervall zunächst unterdrückt wird. Zudem ist auffällig, dass das Fallen der Geschwindigkeit, wie erwähnt, innerhalb von nur 2 s stattfindet. Da keine weitere Streckenzunahme erfolgt, kann ein sprunghafter Geschwindigkeitsabfall schneller verzeichnet werden.

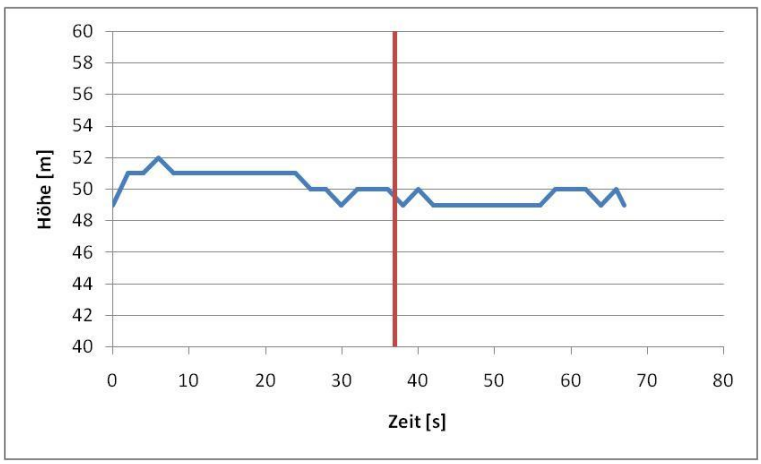


Abbildung 294: Teststrecke 10.0 - Höhenverlauf (Plötzliches Anhalten)

Der Höhenverlauf in Abbildung 294 macht deutlich, dass die angezeigte Höhe auch während der 30-sekündigen Ruhephase um 1 m variiert. Diese Schwankung ist am ehesten auf die Messgenauigkeit des barometrischen Höhenmessers zurückzuführen, da sich kurzzeitige Luftdruckschwankungen innerhalb weniger Sekunden ausschließen lassen.

Unterschiedliche Laufstile

Gehen

Im Folgenden werden die Einflüsse von verschiedenen Laufstilen auf die Genauigkeit des Gerätes überprüft. Der erste Test bezieht sich dabei auf normales Gehen anstelle von Laufen.

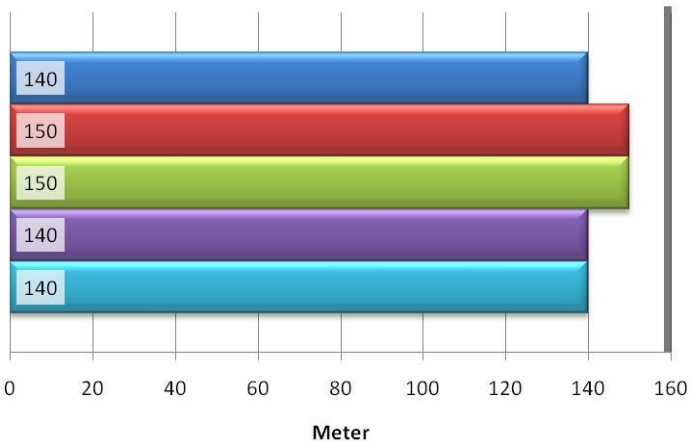


Abbildung 295: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken - Gehen

Mit einem Mittelwert von 144 m (5,5 m Standardabweichung) und keiner Messung über 150 m sind die Strecken auf der Solldistanz von 159 m bei normalem Gehen ebenfalls verkürzt dargestellt (Abbildung 295). Die Streckengenauigkeiten betragen für die 150-Meter-Messungen 94,1 % und für die restlichen Strecken 87,8 %. Wegen der Anzeigegenauigkeit fällt die Genauigkeit bei kurzen Strecken schnell ab.

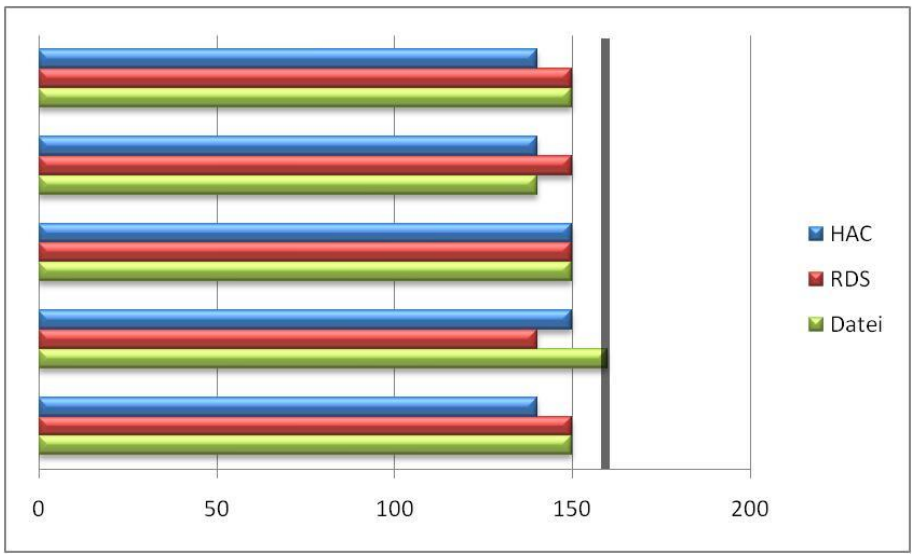


Abbildung 296: Teststrecke 10.0 – HAC-RDS-Datei-Vergleich (Gehen)

Die drei Ausgabevarianten weisen erneut das bekannte Verhalten auf. Insgesamt kommt es zu guten Übereinstimmungen zwischen HAC, RDS und den aufgezeichneten Streckenlängen. Die Abweichungen betragen maximal 20 m zwischen RDS und der Datei,

weiterhin treten nur 10 m große Unterschiede auf. Die Messungen beschreiben im Wesentlichen mit einer Länge von 150 m eine geringfügig zu kleine Distanz.

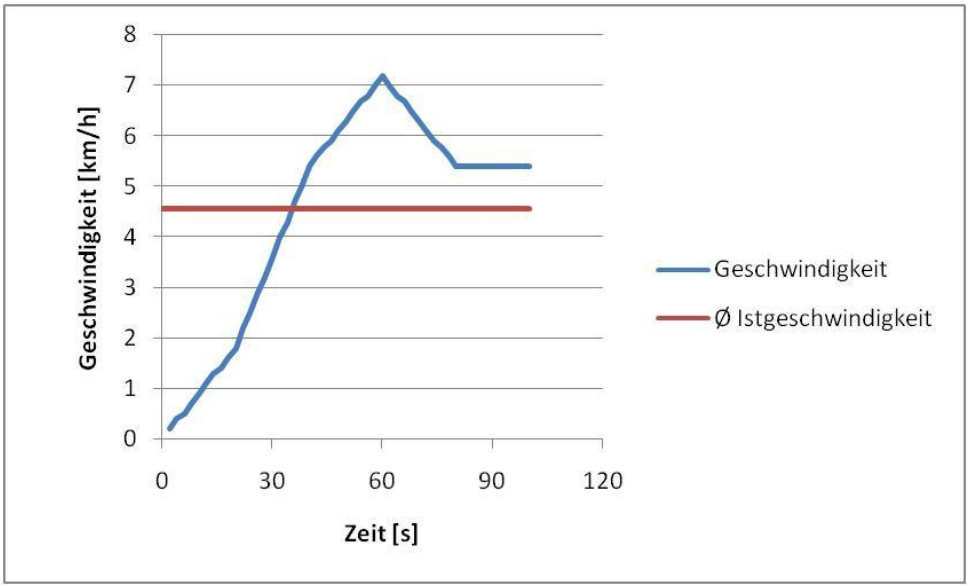


Abbildung 297: Teststrecke 10.0 – Geschwindigkeitskurve im zeitlichen Verlauf

Beim Gehen befindet sich der Sensor in einer sehr konstanten Höhe über dem Boden, es treten nur geringe Erschütterungen auf. Folglich sollte eine Geschwindigkeits- und Entfernungsmessung sehr genau möglich sein. Die Geschwindigkeitskurve eines Laufs in Abbildung 297 zeigt kein auffälliges Verhalten.
Wegen der verhältnismäßig schlechten Aufzeichnungs- und Anzeigegenauigkeit (auf 0,01 km) von RDS und HAC machen sich kurzzeitige Geschwindigkeitsfehlmessungen direkt in der berechneten Streckenlänge bemerkbar. Liegen Aussetzer bei der Registrierung oder zu hoch gemessene Geschwindigkeiten vor, wird die Distanz zu kurz ermittelt. Im obigen Beispiel ist das maximale Tempo von über 7 km/h für durchschnittliches Gehen sehr hoch, infolgedessen wird hier vermutlich eine Fehlmessung stattgefunden haben.

Große und kleine Schrittweiten

Im nächten Test werden die Ergebnisse von Läufen mit großen und kleinen Schrittweiten miteinander verglichen. Die Radarwellen des RDS werden durch die beiden verschiedenartigen Laufstile unterschiedlich beeinflusst.

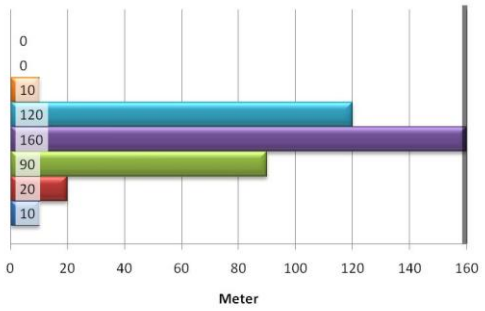


Abbildung 298: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken bei großen Schritten

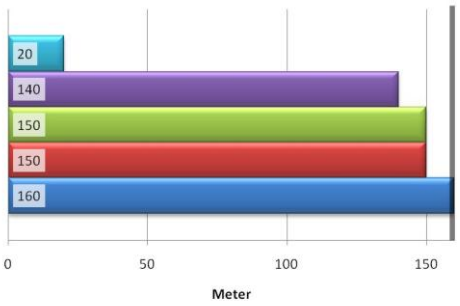


Abbildung 299: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken bei kleinen Schritten

Die Diagramme lassen erkennen, dass beide Laufstile zu unterschiedlichen Strecken führen. Das Laufen mit großen Schritten (Abbildung 298) führt zu sehr heterogenen, mit einer Standardabweichung von 62,9 m stark gestreuten Ergebnissen. Der Mittelwert der Messungen befindet sich bei 51,25 m, was einer mittleren Streckengenauigkeit von nur 32 % entspricht. Dabei stellt ein Ergebnis mit 160 m die geforderte Sollstrecke von 159,4 m sehr genau dar, während bei 5 Anderen Werte zwischen 0 und 20 m registriert werden.

Man kann in Abbildung 299 sehen, dass ein Laufstil mit kleinen Schritten genauere und einheitlichere Ergebnisse aufweisen kann. Ein Ausreißer mit nur 20 m befindet sich zwischen den ansonsten im Bereich 140 – 160 m liegenden Messwerten. Dieser kann auf eine zu seitliche Ausrichtung des Gerätes zurückgeführt werden und wird daher bei der weiteren Betrachtung nicht mit einbezogen. Der Mittelwert von 150 m und eine Standardabweichung von 8 m beschreiben den Sollwert mit einer Genauigkeit von 94 % recht präzise.

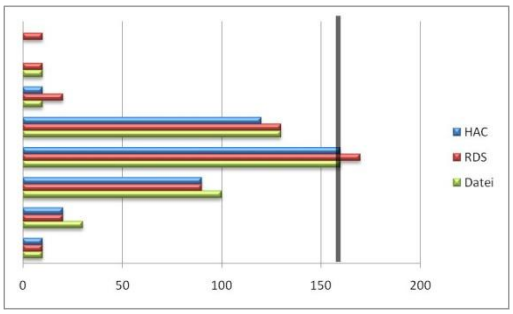


Abbildung 300: Teststrecke 10.0 – HAC-RDS-Datei-Vergleich (große Schritte)

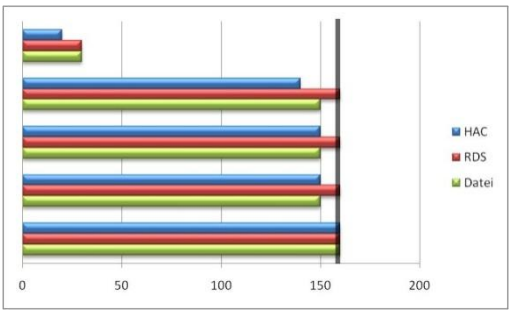


Abbildung 301: Teststrecke 10.0 - HAC-RDS-Datei-Vergleich (kleine Schritte)

Bei einem Vergleich der durch HAC angezeigten und gespeicherten und von RDS angezeigten Strecken wird deutlich, dass bei beiden Tests zum wiederholten Male nur kleine Abweichungen zwischen den Werten aufgetreten sind.

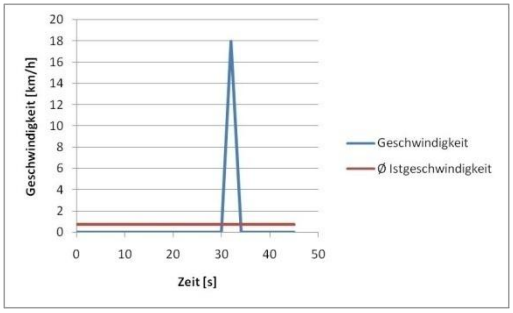


Abbildung 302: Teststrecke 10.0 – Geschwindigkeitskurve im zeitlichen Verlauf (großen Schritte)

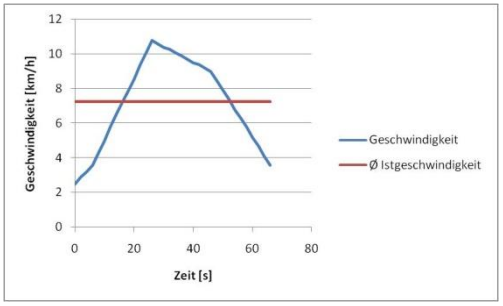


Abbildung 303: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf bei kleinen Schritten

Das unterschiedliche Verhalten der Streckenmessgenauigkeit bei den beiden Laufstilen lässt sich anhand der Geschwindigkeitskurven in zeitlicher Abhängigkeit schildern. Abbildung 302 kann entnommen werden, dass während der Testdurchführung bis auf eine Ausnahme keine Bewegung wahrgenommen werden kann. Bei 32 s tritt jedoch mit 18 km/h ein deutlich zu hoher Wert auf. Das Verhalten wird durch den Bewegungsablauf bei Schritten großer Weite hervorgerufen. Die Radarwellen werden durch die Knie des Läufers beim Vorwärtsschritt gestört. Daher empfängt das RDS sehr ungleichmäßige, mit Cluttersignalen versetzte Echos verschiedener Längeninformationen (Laufzeiten). Die Geschwindigkeit lässt sich folglich nicht oder nur teilweise ermitteln.
Bei kleinen Schritten hingegen treten keine zusätzlichen Störsignale durch Wellenunterbrechungen ein. Eine Geschwindigkeitsermittlung ist hier weitestgehend fehlerlos möglich, wie Abbildung 303 entnommen werden kann.

Springen

Der Test „Springen“ soll die Auswirkungen einer ungleichmäßigen Höhe des RDS über dem Boden mit starken Erschütterungen aufzeigen.

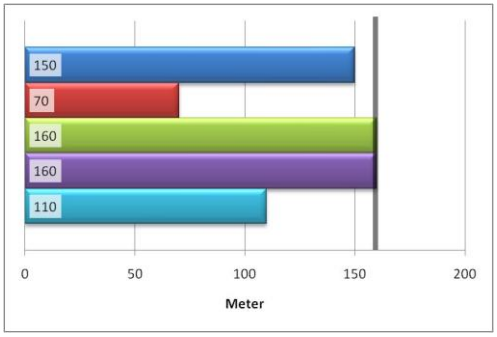


Abbildung 304: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken (Springen)

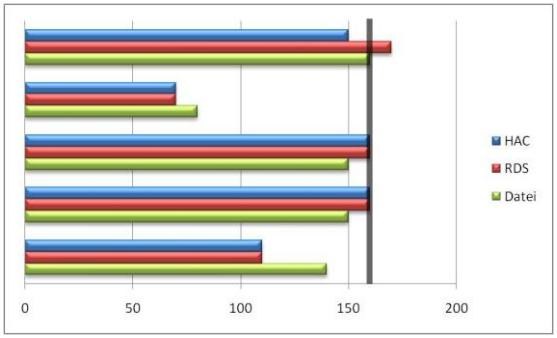


Abbildung 305: Teststrecke 10.0 - HAC-RDS-Datei-Vergleich (Springen)

In den beiden Diagrammen ist zu sehen, dass das Springen zu abweichenden Ergebnissen führt. Die Sollstrecke von 159 m wird bei drei Läufen zuverlässig beschrieben, während zwei Messungen zu deutlich verkürzten Distanzen führen. Eine hohe Standardabweichung von 39,4 m unterstreicht die Heterogenität der Werte. Der Mittelwert von 130 m entspricht einer durchschnittlichen Streckenmessgenauigkeit von 82 %, wobei sich die Einzelgenauigkeiten in einem Bereich zwischen 44 % und 100 % befinden. In einigen Fällen können sich somit die ungleichmäßige Höhe des RDS über dem Boden und die Erschütterung negativ auf die Genauigkeit auswirken.

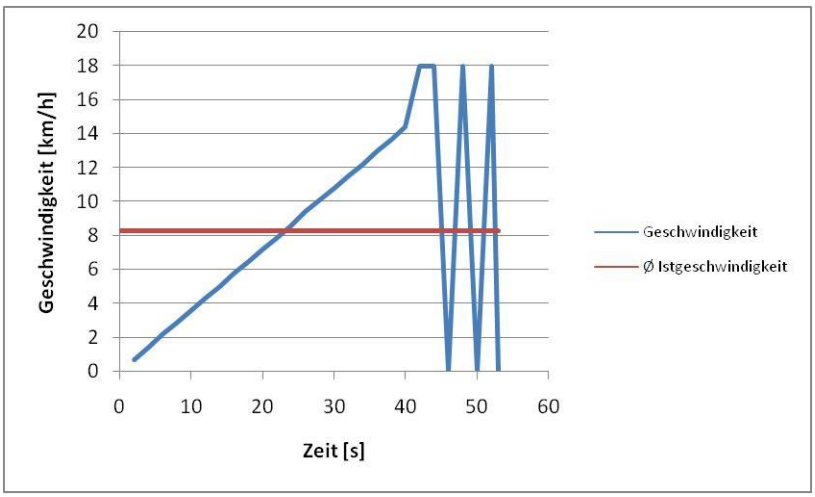


Abbildung 306: Teststreck 10.0 - Geschwindigkeitskurve im zeitlichen Verlauf (Springen)

Abbildung 306 stellt die Geschwindigkeitsänderung im zeitlichen Verlauf einer 160-Meter-Messung dar. Die Strecke wurde somit korrekt angezeigt, obwohl die Geschwindigkeit nach einem 40-sekündigen linearen Anstieg deutliche Auffälligkeiten aufweist. Wie bereits häufiger bemerkt, tritt auch in diesem Diagramm das typische Alternieren der Geschwindigkeit auf. Allerdings finden die Sprünge zwischen den Niveaus von 18 und 0 km/h statt. Zudem liegt eine rascher Wechsel vor, da in diesem

Fall die Extremwerte nur 2 s (anstelle der bei vorhergehenden Fällen beobachteten 20 s) voneinander entfernt liegen.
Die Speicherung in 20-Sekunden-Intervallen ist eine Folge der Aufzeichnungsgenauigkeit. Diese ist auf 10 m begrenzt. Eine Streckenänderung kann sich demnach, abhängig von der gelaufenen Geschwindigkeit, nur in bestimmten zeitlichen Abständen darstellen.

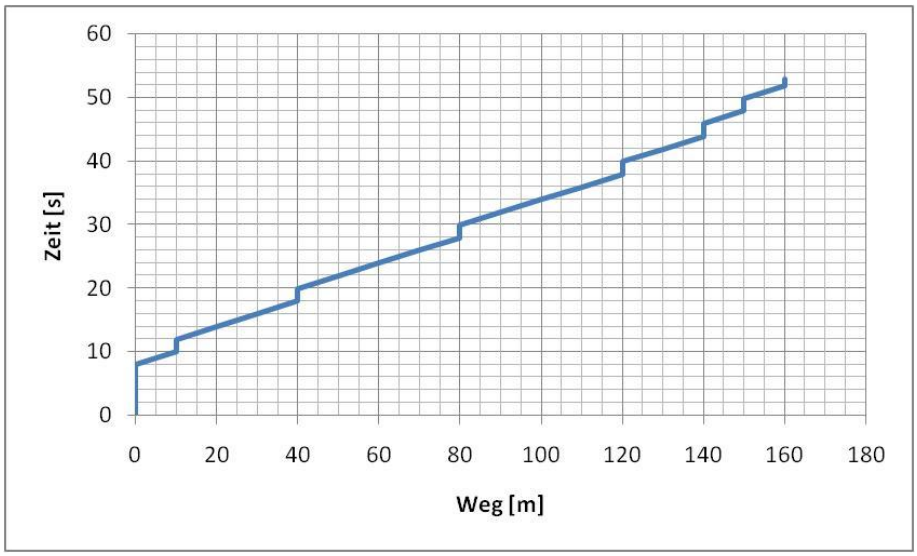


Abbildung 307: Teststrecke 10.0 - Zeit-Weg-Diagramm (Springen)

Das Diagramm (Abbildung 307) zeigt, dass nach dem Start über große Teile der Strecke 10 s für eine Teildistanz von 20 m benötigt wurden. Ist dabei ein Vielfaches von 40 m erreicht, so wird dieser Wert für 2 Speicherintervalle übernommen. Hierauf beruhen die kurzen senkrechten Linienabschnitte. Gegen Ende der Strecke wird ein 20-Meter-Abschnitt innerhalb von kürzerer Zeit zurückgelegt (Geschwindigkeit steigt) und das vorherige Intervall von 40 m für die doppelte Streckenabspeicherung verringert sich zunächst auf 20 m und schließlich 10 m.
Der Grafik kann entnommen werden, dass demzufolge eine 10 m lange Strecke nach 2 s überwunden ist, was einer Geschwindigkeit von 5 m/s bzw. 18 km/h entspricht.
Da sich die doppelte Speicherung ab einer Strecke von 140 m auf 10 m reduziert hat und nach jeden 2 s dieser Weg bereits zurückgelegt ist, muss pro 10 m eine Zeit von 4 s vorgesehen werden. Wegen der Aufzeichnungsgenauigkeit von nur 10 m können diese nicht auf 2 Speicherpunkte aufgeteilt werden. Daraus resultiert ein 18 km/h schneller Wert, während der Nachfolgende 0 km/h aufweist. Tatsächlich beträgt die Geschwindigkeit jedoch nur 9 km/h. Anhand dieses Verhaltens lässt sich das Alternieren erklären.
Die doppelte Speicherung von Distanzen erfolgt wegen einer zu niedrigen gelaufenen Geschwindigkeit. Es müssten mehr als 10 m Strecke innerhalb von 2 s (>18 km/h) überwunden werden, damit eine einfache Auszeichnung der Werte erfolgt.
Das Verhalten ist das Resultat der Speicherungsmethode des HAC und hat somit keine Auswirkung auf die ermittelten Geschwindigkeiten bzw. Strecken.

Rückwärtslaufen

Im folgenden Test wird untersucht, ob Rückwärtslaufen einen Einfluss auf die Genauigkeiten hat. Das RDS wurde dabei entgegengesetzt der Bewegungsrichtung ausgerichtet.

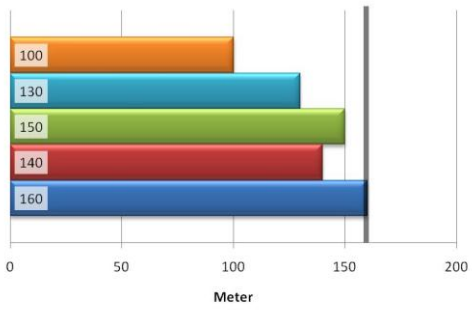


Abbildung 308: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken (Rückwärtslaufen)

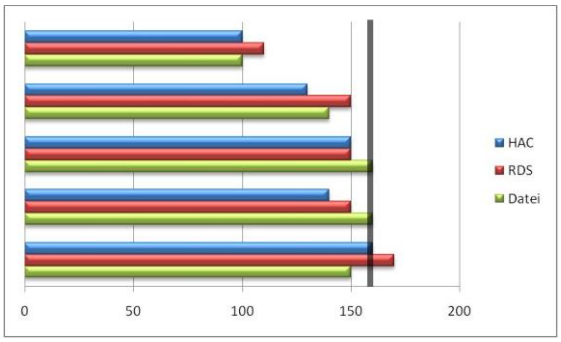


Abbildung 309: Teststrecke 10.0 – HAC-RDS-Datei-Vergleich (Rückwärtslaufen)

Die auf dem HAC angezeigten Strecken in Abbildung 308 weisen erneut mit einer Standardabweichung von 23 m eine hohe Variabilität auf. Der einer Genauigkeit von 85 % (in Bezug auf die tatsächliche Strecke) entsprechende Mittelwert liegt bei 136 m. Die Genauigkeiten der Einzelmessungen betragen zwischen 63 % und 100 %. Mit Rückwärtslaufen lassen sich zum Teil sehr gute, aber auch mangelhafte Ergebnisse ohne ersichtlichen Grund erzielen.

In der Tabelle sind die Unterschiede zwischen den drei Ausgabemethoden aus Abbildung 309 zahlenmäßig beschrieben.

	HAC-Display	HAC-Datei	RDS
Mittelwert [m]	136	142	146
Standardabweichung [m]	23,0	24,9	21,9
Mittlere Genauigkeit	85 %	89 %	92 %

Es stellt sich heraus, dass bei diesen Testläufen Abweichungen von bis zu 20 m auftreten. Im Wesentlichen werden die kürzesten Strecken dabei auf dem Display des HAC ausgegeben, während sich die Längsten am RDS ablesen lassen. Dies macht sich in den Mittelwerten der drei Varianten bemerkbar. Die Sollstrecke von 159 m wird mit der höchsten (durchschnittlichen) Genauigkeit durch das RDS beschrieben.

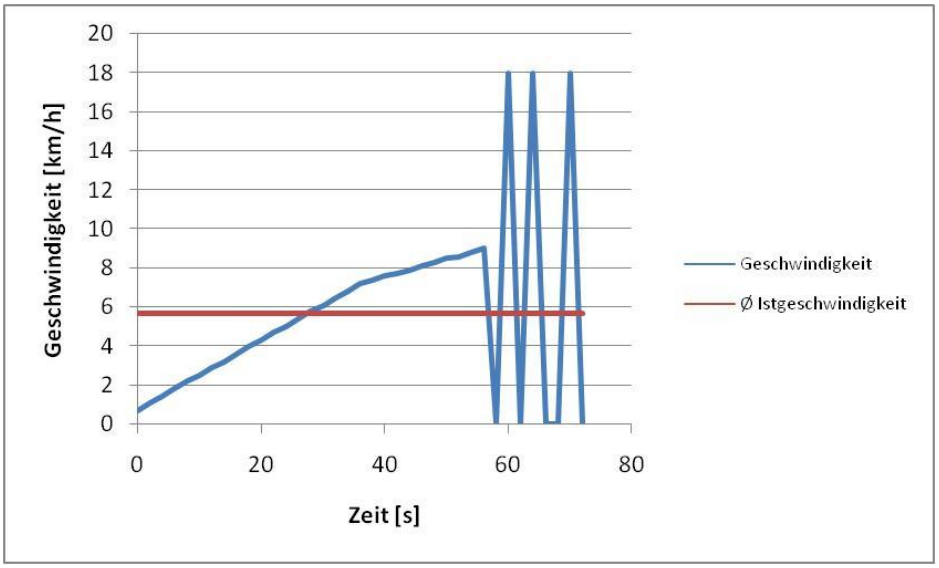


Abbildung 310: Teststrecke 10.0 – Geschwindigkeitskurve im zeitlichen Verlauf (Rückwärtslaufen)

Wie schon beim Test „Springen“ gesehen und beschrieben, tritt auch hier das auffällige Verhalten der Geschwindigkeit auf. Die Kurve alterniert erneut zwischen den beiden Werten 0 und 18 km/h. Die Problematik betrifft nur die Speicherung der Werte, da die zum Diagramm gehörende Strecke mit 160 m, ungeachtet des Verhaltens bei den Geschwindigkeiten, richtig berechnet werden konnte.

Walking

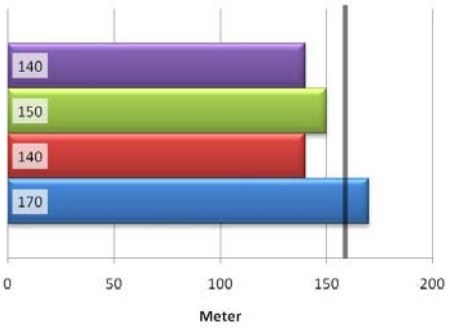


Abbildung 311: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken (Walking)

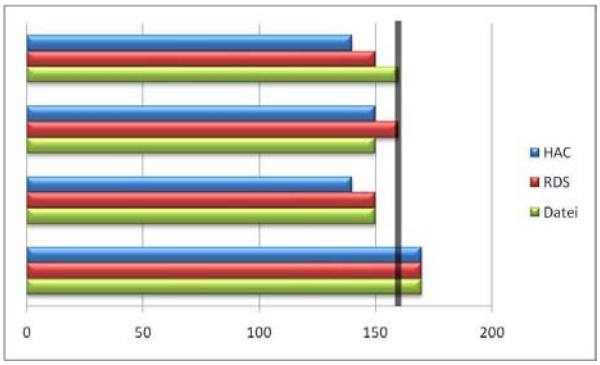


Abbildung 312: Teststrecke 10.0 - HAC-RDS-Datei-Vergleich (Walking)

Neben den bereits angeführten Laufstilen wurde das Genauigkeitsverhalten des RDS auch beim Walking untersucht. Die auf dem HAC angezeigten Ergebnisse der Testläufe sind in Abbildung 311 veranschaulicht. Als Durchschnittswert ergibt sich 150 m (=94 %). Anhand der Standardabweichung von 14,1 m wird ersichtlich, dass die Zahlenwerte weniger streuen als bei den beiden Laufstilen in den vorherigen Tests.

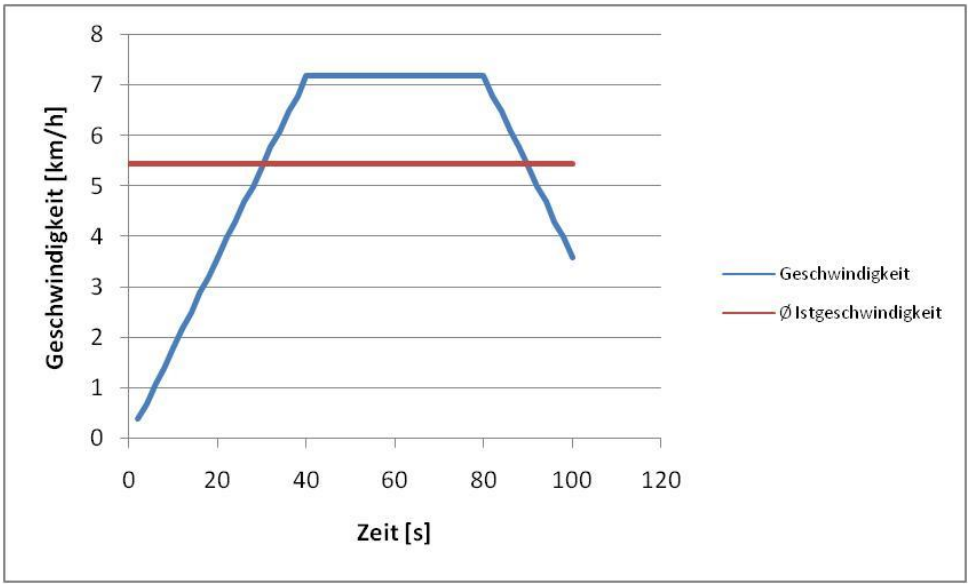


Abbildung 313: Teststrecke 10.0 – Geschwindigkeitskurve im zeitlichen Verlauf (Walking)

Der dargestellte Geschwindigkeitsverlauf beim Walken ist stetig und weist im Gegensatz zu den beiden vorherbetrachteten Tests keine Schwankungen auf.

4.5.5 Messprinzip Fahrradcomputer

Die Multifunktionsuhr HAC5 von CicloSport ist primär als Fahrradcomputer ausgelegt. Mit dem optionalen RDS-Gerät lassen sich auch bei anderen Sportarten wie Laufen oder Skifahren Informationen zu Geschwindigkeiten und Distanzen ermitteln, deren Messgenauigkeiten bereits beschrieben sind.
Der folgende Abschnitt wird sich mit der Genauigkeitsuntersuchung des HAC5 als Fahrradcomputer befassen. Als Sensor zur Geschwindigkeits- und Streckenmessung wird dabei ein kabelloser Sender in Kombination mit einem Speichenmagnet verwendet. Das Messprinzip ist in Abschnitt 2.2 erläutert.
Entscheidend für die Streckengenauigkeit ist der Umfang des Rades. Er wurde an den Tagen der Testdurchführungen mit Hilfe der Abrollmethode fünf Mal bestimmt und als gemittelter Wert in den Sportcomputer eingegeben, um eine hohe Präzision zu gewährleisten.

Teststrecke 1.0 (optimale Bedingungen)

Zunächst wurde ein Genauigkeitstest unter optimalen Bedingungen auf Teststrecke 1.0 durchgeführt. Die zu fahrende Strecke hat einen Sollwert von 500 m und führt entlang einer geraden, geteerten und wenig befahrenen Straße.

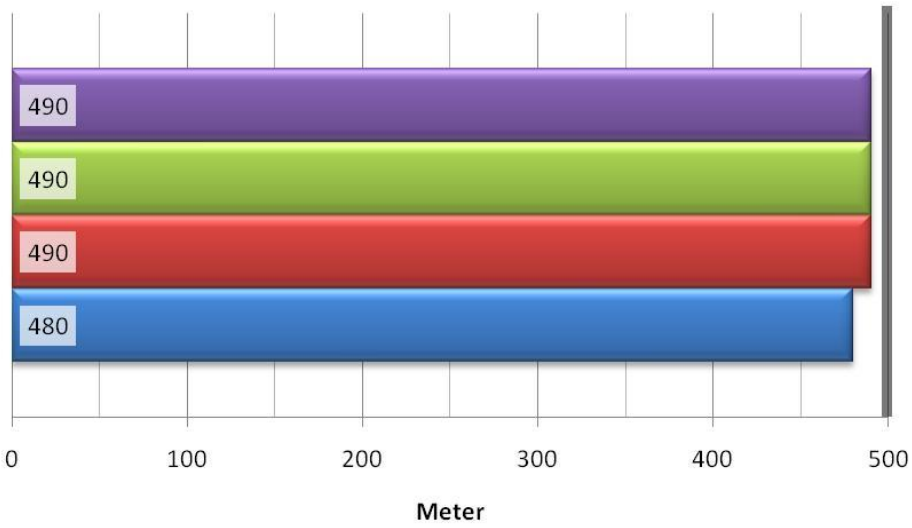


Abbildung 314: Teststrecke 1.0 - angezeigte Strecken (Fahrradcomputer HAC)

Wie bereits aus den Tests mit dem RDS bekannt sein dürfte, werden Distanzen vom Fahrradcomputer HAC5 auf 0,01 km und Geschwindigkeiten auf 0,1 km/h genau ausgegeben und gespeichert.
In Abbildung 314 sind die auf dem Display abgelesenen Strecken nach einer gefahrenen tatsächlichen Distanz von 500 m angegeben. Ergeben haben sich dreimal 490 m und einmal 480 m. Die Genauigkeiten liegen dementsprechend in einem Bereich von 96 % und 98 %. Die Standardabweichung von nur 5 m unterstreicht die geringe Streuung und damit verbundene Beständigkeit bei den Messungen. Aus den Testergebnissen resultiert ein Mittelwert von 487,5 m, der eine durchschnittliche Streckengenauigkeit von 97,5 % beschreibt.

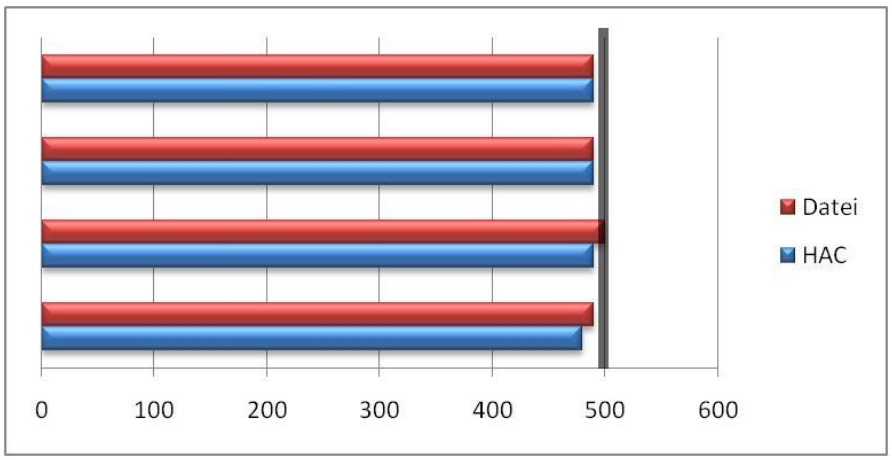


Abbildung 315: Teststrecke 1.0 –angezeigte und gespeicherte Strecken (Fahrradcomputer HAC)

Neben den angezeigten Strecken können die fahrdynamischen Parameter auch in einer Datei aufgenommen und nach der Tour analysiert werden. Schon bei den Tests mit HAC und RDS hat sich herausgestellt, dass es zu Unterschieden zwischen Werten auf dem

Display und im Protokoll kommen kann. Aus diesem Grund werden in Abbildung 315 die Distanzen beider Medien gegenüber gestellt.
Es zeigt sich, dass zwei übereinstimmende Wertepaare vorliegen, während die Strecken aus der Datei bei den beiden anderen Messungen um jeweils 10 m größer als die Ausgegebenen sind. Dies deutet erneut auf eine Anzeigeverzögerung des HAC-Displays hin. Die Daten werden nach den Berechnungen und Auswertungen der Informationen zuerst gespeichert. Anschließend vergeht eine kurze Zeit, bis diese auf dem Sportcomputer abgelesen werden können.
Aufgezeichnet wurden dreimal 490 m und einmal 500 m. Da die im Protokoll registrierten Strecken etwas größer sind, beschreiben sie den Sollwert von 500 m mit einem Mittelwert von 492,5 m (Standardabweichung ebenfalls 5 m) etwas besser. Die Genauigkeiten betragen hierbei 98 % und 100 % für die Einzelwerte und im Durchschnitt 98,5 %.
Anzumerken ist, dass die Genauigkeiten durch die begrenzte Ausgaben- und Speicherpräzision auf 0,01 km geprägt sind. Eine detailliertere Beschreibung der Strecke könnte zu noch aussagekräftigeren Genauigkeiten führen.

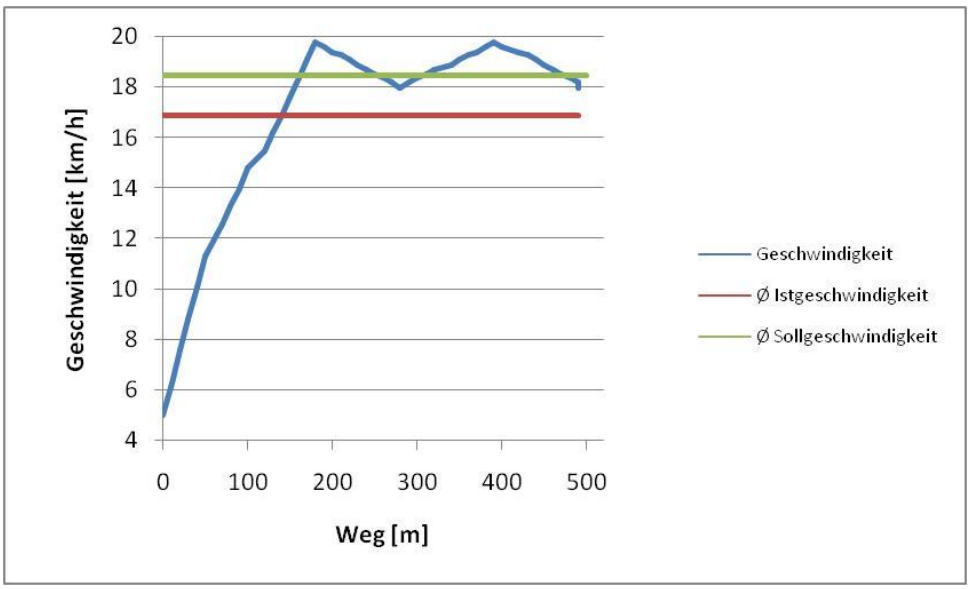


Abbildung 316: Teststrecke 1.0 - Geschwindigkeitsverlauf (Fahrradcomputer HAC)

In Abbildung 316 ist der zur ersten Testfahrt (angezeigte Streckenlänge 490 m) gehörende Geschwindigkeitsverlauf dargestellt. Man erkennt, dass er aus mehreren linearen Teilstücken zusammengesetzt ist. Begründen lässt sich das Verhalten mit dem Speicheralgorithmus des HAC5.
Während der Testdurchführung wurde auf eine gleichbleibende Geschwindigkeit geachtet. Der generelle Verlauf erscheint recht konstant mit Geschwindigkeiten zwischen 18 und 20 km/h. Aus diesem Grund ist keine Fehlfunktion des Sensors zu verzeichnen.

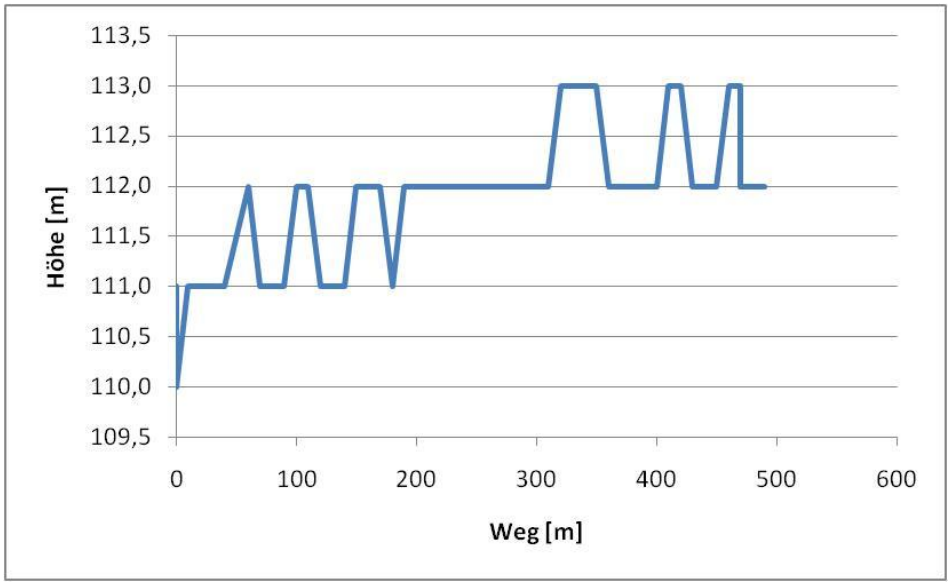


Abbildung 317: Teststrecke 1.0 - Höhenverlauf (Fahrrad HAC)

Neben Geschwindigkeit und Strecke registriert der Fahrradcomputer während der Fahrt u.a. Relativhöhen mit dem Verfahren der barometrischen Höhenmessung. Ein Höhenverlauf ist in Abbildung 317 dargestellt. Wegen der erhöhten Geschwindigkeit im Vergleich zum Laufen stellt das Fahrradfahren größere Anforderungen an die beiden Sensoren Thermometer und Barometer in der Sportuhr. Da Höhenmeter schneller überwunden werden, müssen Luftdruckänderungen innerhalb kurzer Zeit registriert werden können. Der gezeigte Höhenverlauf spiegelt die relativen Höhenänderungen korrekt wieder.

Teststrecke 8.0 (kurviger Streckenverlauf)

In einem weiteren Test wurde der Fahrradcomputer HAC5 einer Genauigkeitsanalyse auf einer kurvigen Strecke unterzogen. Als Durchführungsort diente dabei die 1081,8 m lange Teststrecke 8.0 auf dem EXPO-Gelände.

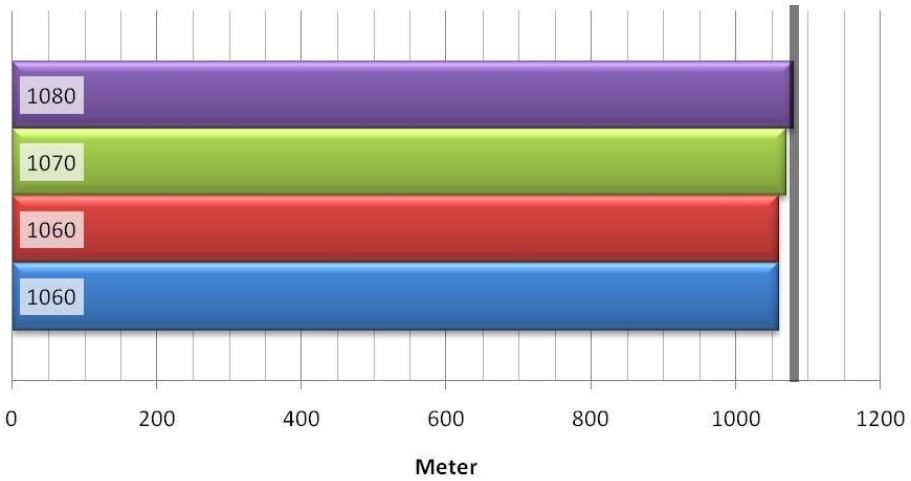


Abbildung 318: Teststrecke 8.0 - angezeigte Strecken (Fahrradcomputer HAC)

Abbildung 318 verdeutlicht die auf dem Display des HAC angezeigten Strecken. Es treten Werte zwischen 1060 m und 1080 m auf. Diese entsprechen Streckengenauigkeiten von 98 % - 100 %. Der Mittelwert beträgt 1067,5 m mit einer Standardabweichung von 9,6 m. Im Durchschnitt lassen sich somit Genauigkeiten von 98,7 % bezogen auf die Sollstrecke von 1081,8 m erreichen.

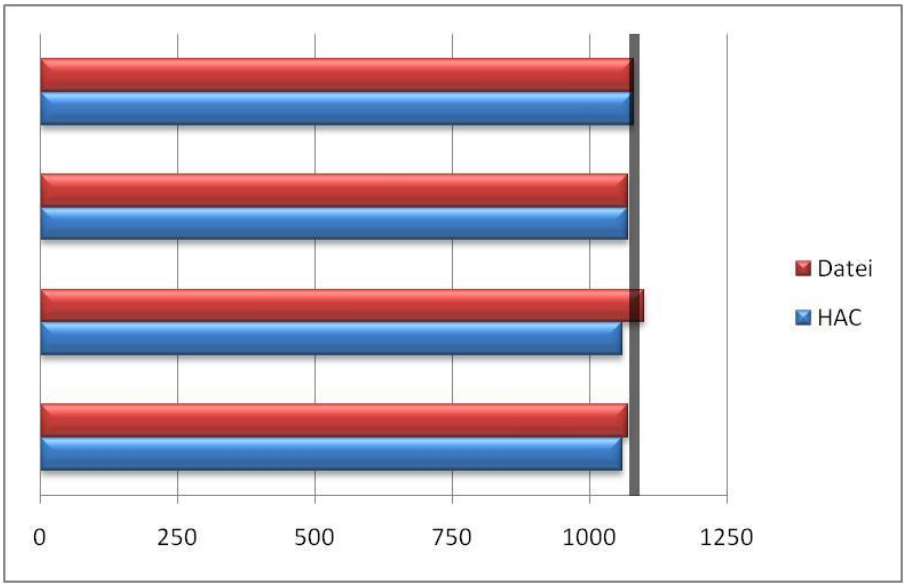


Abbildung 319: Teststrecke 8.0 - angezeigte und gespeicherte Strecken (Fahrradcomputer HAC)

Wie Teststrecke 1.0 gezeigt hat, ist der Vergleich zwischen den angezeigten und abgespeicherten Streckenwerten interessant. In diesem Fall ergibt sich ein ähnliches Bild: Wieder entsprechen sich zwei Wertepaare exakt, während bei den anderen beiden die jeweils aufgezeichnete Strecke etwas größer ist. Aus der Datei ergeben sich die Werte 1070 m (2 mal), 1080 m und 1100 m. Diese entsprechen den Abweichungen 1,1 %, 0,2 % und 1,2 %. Als Mittelwert berechnet sich 1080 m (Standardabweichung 14,1 m), welcher die Sollstrecke im Rahmen der Aufzeichnungsgenauigkeit zu 100 % richtig darstellt.

Zusammengefasst sind in der Datei erneut längere Distanzen verzeichnet, welche die tatsächliche Strecke genauer beschreiben. Durch die höhere Geschwindigkeit macht sich die Anzeigeverzögerung des Displays beim Fahrradcomputer stärker bemerkbar. So werden z.T. bis 40 m zu kleine Werte ausgegeben, während diese bei der Aufzeichnung korrekt erfasst wurden.

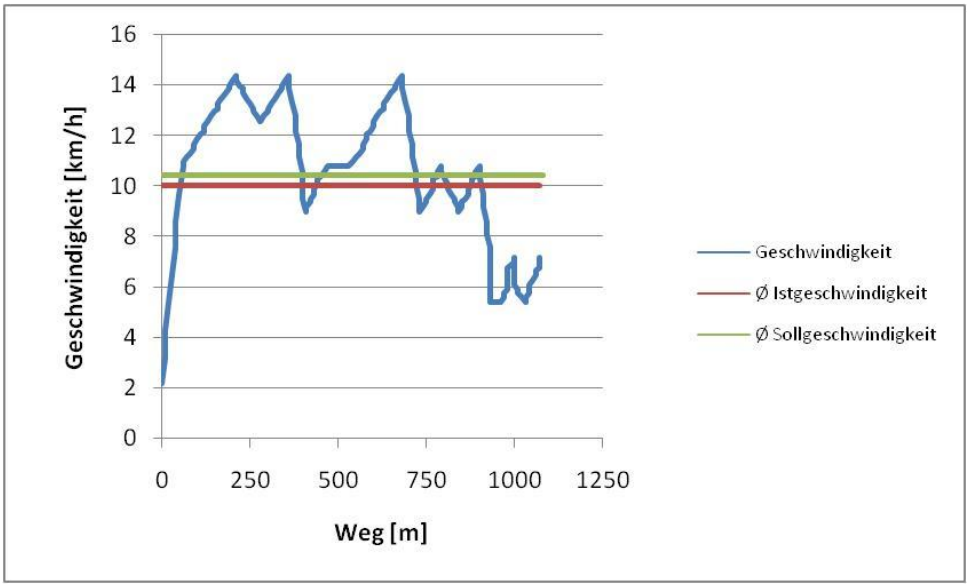


Abbildung 320: Teststrecke 8.0 - Geschwindigkeitsverlauf (Fahrradcomputer HAC)

In Abbildung 320 wird der Geschwindigkeitsverlauf entlang der Strecke dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Geschwindigkeit leicht variiert. Die auftretenden Extremwerte können den markanten Stellen der Strecke zugeordnet werden. Beispielsweise beschreibt der Geschwindigkeitsabfall von 14,4 km/h auf 9 km/h bei 410 m die Steigung vor dem Ungarischen Pavillon und die daran anschließende scharfe Kurve. Die folgende Geschwindigkeitszunahme resultiert aus der etwa 4 m abfallenden, geraden Strecke entlang der „Avenida de Sevilla“. Das Geschwindigkeitsprofil beschreibt das tatsächliche Verhalten, soweit aus den generalisierten Daten ersichtlich, genau.

Stellt man die Geschwindigkeit wie in Abbildung 321 in einen zeitlichen Zusammenhang, so lässt sich erneut das Speicherverhalten des HAC5 deutlich machen. Auch bei dieser Messung befinden sich wieder alle Knickpunkte an einer durch 20 s teilbaren Position auf der Zeitachse. Die Verbindungsstücke werden durch gerade Linien repräsentiert, da die fehlenden Zwischenpunkte durch lineare Interpolation berechnet und abgespeichert wurden.

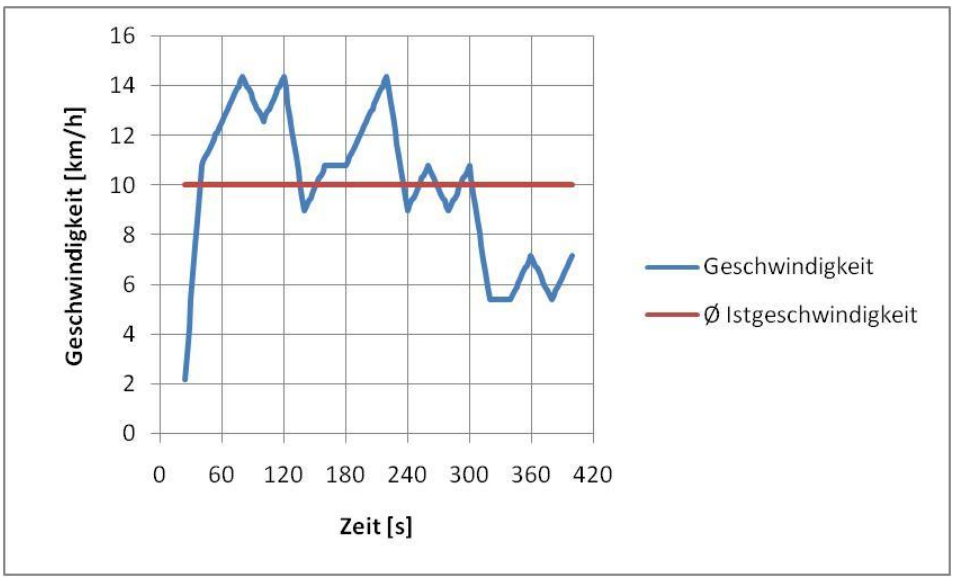


Abbildung 321: Geschwindigkeitskurve im zeitlichen Verlauf (Fahrradcomputer HAC)

Eine Betrachtung des Höhenprofils in Abbildung 322 zeigt, dass der Streckenverlauf einwandfrei registriert wurde. Die senkrechten Verbindungen in der Darstellung resultieren aus 2 aufeinanderfolgenden Speicherpunkten, an denen dieselbe Strecke verzeichnet wurde. Trägt man anstelle des Weges die Höhe gegen die Zeit auf, so ergibt sich ein nur leicht differierendes Profil (Abbildung 323).

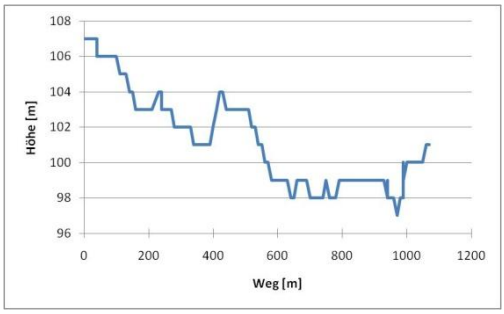


Abbildung 322: Teststrecke 8.0 - Höhenverlauf (Fahrradcomputer HAC)

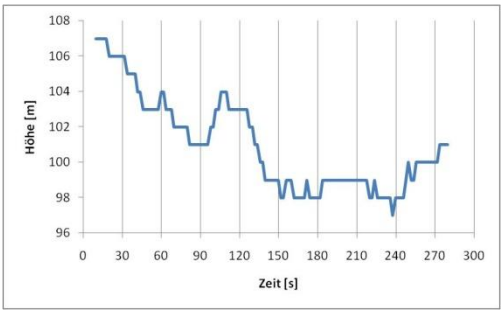


Abbildung 323: Teststrecke 10.0 - Höhe im zeitlichen Verlauf (Fahrradcomputer HAC)

4.5.6 Messprinzip barometrische Höhenmessung

Zur Untersuchung der Genauigkeit des eingesetzten barometrischen Höhenmessers wurden Tests im Außenbereich (Teststrecke 4.0 und 4.1) sowie innerhalb eines Gebäudes durchgeführt. Betrachtet man die Höhenprofile aus den Tests zuvor, so fällt schnell auf, dass diese keine größeren Schwankungen aufweisen und die aufgezeichnete Höhe oft über längere Zeiträume stabil bleibt. Das Barometer des HAC 5 benötigt einen Referenzwert, um Differenzdrücke messen zu können. Für die Bestimmung absoluter Höhen muss also ein Bezugspunkt vorhanden sein, der eine bekannte Höhe besitzt und mit dessen Hilfe der Höhenmesser zunächst geeicht wird. In Abbildung 324 wird der Startpunkt am Fuße des Hügels als Referenzhöhe genutzt und ausschließlich die notierten Höhenunterschiede betrachtet. Dabei beschreiben die angezeigten Entfernungen und die zugehörigen Höhen die tatsächliche Topographie der Strecke sehr gut, es kommt lediglich zu Abweichungen zu den relativen Sollhöhen von < 2 m.

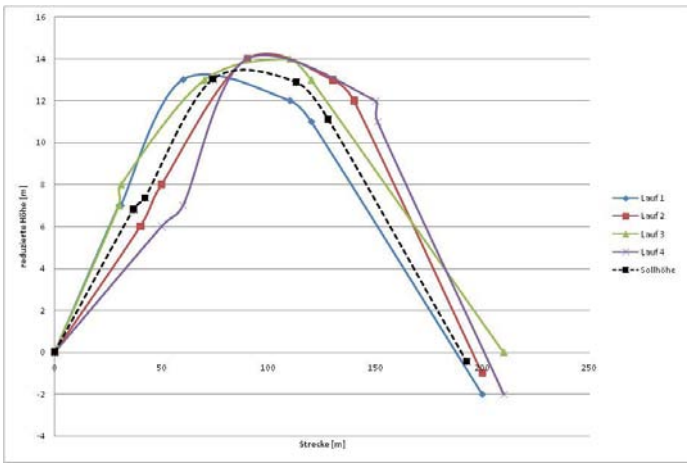


Abbildung 324: Teststrecke 4.0 – Relative Höhen

Die registrierten Werte entsprechen den zu den jeweiligen Zeitpunkten angezeigten Werten, wie beispielhaft in Abbildung 325 dargestellt. Auch der Vergleich aller Läufe in Abbildung 326 bestätigt dies.

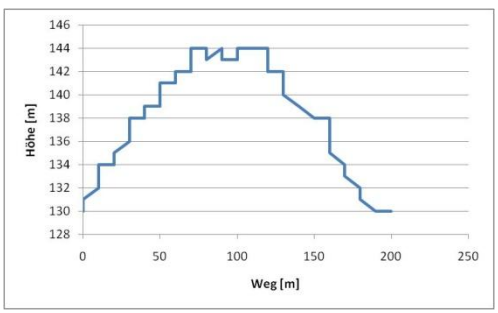


Abbildung 325: Teststrecke 4.0 – Einzelner Höhenverlauf

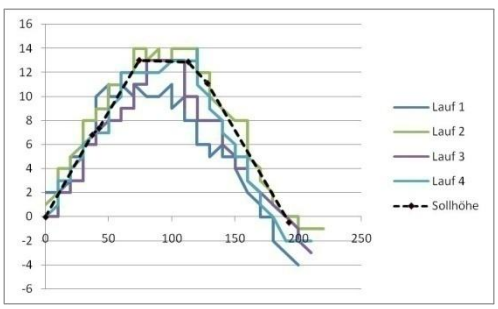


Abbildung 326: Teststrecke 4.0 – Vergleich aller Läufe mit relativer Sollhöhe

Teststrecke 4.1 bietet eine gleichmäßige Steigung bzw. ein gleichmäßiges Gefälle über eine längere Strecke von 259 m (siehe Teststrecken). Hier fanden weitere Genauigkeitsuntersuchungen statt. Dabei wurden zwei Höhen genau gemessen, wodurch ein Höhenunterschied von 12,41 m zustande kommt. An diesen zwei Stellen fanden daraufhin auch die Ablesungen statt. Reduziert auf die Anfangshöhe ergeben sich in Abbildung 327 Abweichungen zur Sollhöhe, auf der Krone des Gipfels, zu maximal 1,59 m (Lauf 2). Dabei ist auch anzumerken, dass das Auflösungsvermögen für Höhen beim HAC 5 nur 1 m beträgt, so dass es hier einmal zur minimalen Abweichung von 41 cm kommt (Lauf 1).

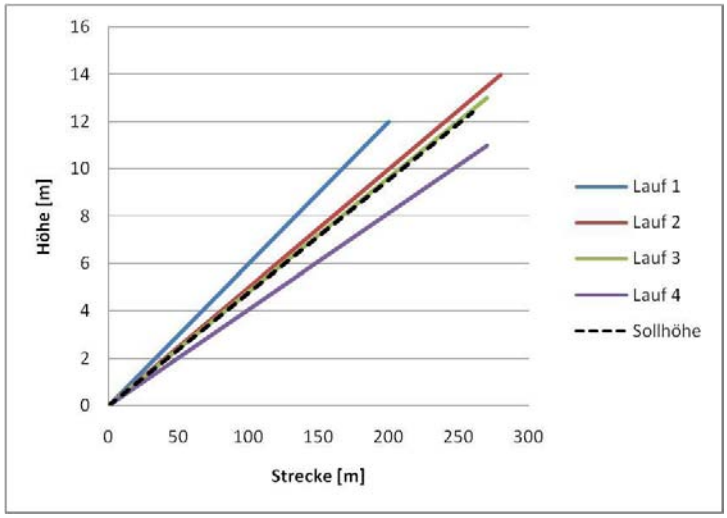


Abbildung 327: Teststrecke 4.1 – Relative Höhen

Bei Teststrecke 4.1 können erneut keine Differenzen zwischen angezeigten und gespeicherten Höhen festgestellt werden. Abbildung 328 zeigt ein einzelnes Höhenprofil, was einen Gesamthöhenunterschied von 13 m beschreibt. Es treten kaum größere Schwankungen auf, so dass die Kurve einen fast linearen Anstieg aufweist. Bis auf Lauf 3 zeichnet sich sonst ein ähnlicher Verlauf ab (siehe Abbildung 329).

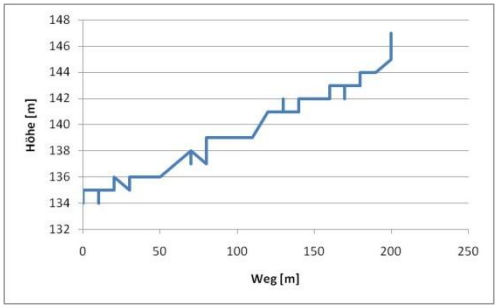


Abbildung 328: Teststrecke 4.1 – Einzelner Höhenverlauf

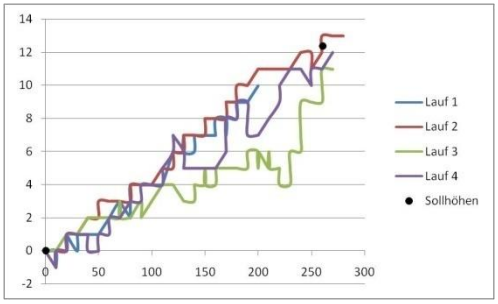


Abbildung 329: Teststrecke 4.1 – Vergleich aller Läufe mit relativer Sollhöhe

Um das Verhalten des Höhenmessers letztendlich noch unter möglichst geringem Einwirken von meteorologischen Einflüssen zu testen, wurde die Teststrecke MZ genutzt. Diese befindet sich in vertikaler Anordnung im Treppenhaus des „MZ-Gebäudes“ der Universität Hannover. Der HAC 5 wurde zunächst auf dem Anfangspunkt geeicht, um einen Vergleich mit den absoluten Sollhöhen zu ermöglichen. In Abbildung 330 werden die gemessenen Höhen dargestellt. Die Abweichungen liegen bei durchschnittlich 1,14 m und die Standardabweichung beträgt 0,83 m. Während zu Beginn der Messung noch keine Differenzen zum Sollwert auftreten, sind es nach einem Höhenunterschied von 70 m bereits 1 bis 2 m. Daraus resultiert eine Genauigkeit von > 98,3 %.

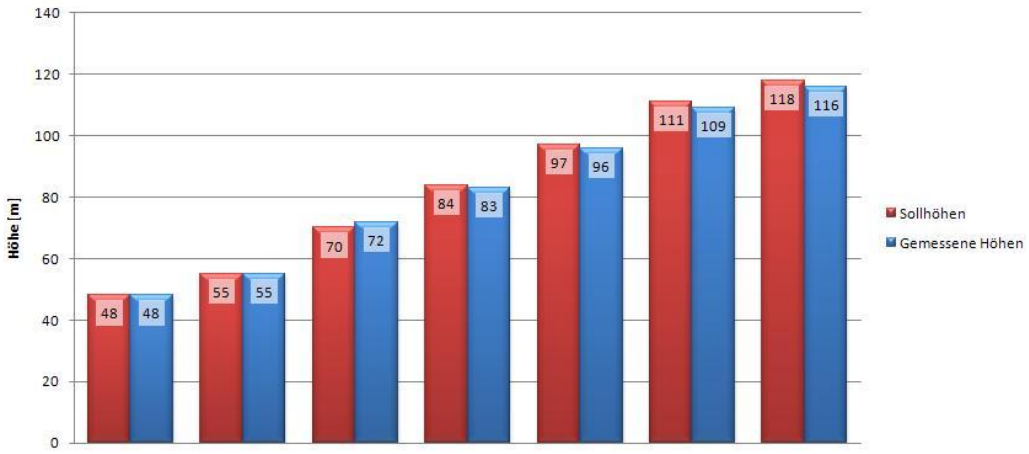


Abbildung 330: Teststrecke MZ – absolute Höhen

4.5.7 Zusammenfassung

Der HAC5 von CicloSport stellt einen gut ausgestatteten, multifunktionalen Fahrradcomputer dar. Die Möglichkeit, ihn in Kombination mit dem optionalen RDS-Gerät auch bei anderen Sportarten zu nutzen, führt zu großer Vielseitigkeit.
Der Lieferumfang ist sehr umfassend: Neben dem HAC5 enthält das Packet mit Pulsmesser, kabellosen Sensoren für Geschwindigkeit und Trittfrequenz, Montagematerialien für die Befestigung am Fahrrad, 4 Batterien, einer Armbandhalterung, USB-Kabel, CD-ROM mit Handbuch und Auswertungssoftware alles, was zum Gebrauch als Fahrradcomputer notwendig ist.
Hauptkritikpunkt ist die Bedienung des Computers. 6 Druckknöpfe stehen zur Verfügung, um die insgesamt 95 Funktionen vorzunehmen. Abhängig von der Länge des Betätigens und mit der Kombination anderer Tasten werden unterschiedliche Aktionen ausgeführt. Im 38 seitigen Handbuch, welches nur in digitaler Form vorliegt, werden auf 28 Seiten diverse Tastenkombinationen beschrieben. Die wichtige Funktion des Aufzeichnens lässt sich so beispielsweise nur über das gleichzeitige, 3 Sekunden lange Drücken zweier Tasten umständlich starten. Bis der HAC vollständig beherrscht wird, ist einige Einarbeitungszeit erforderlich. Hinzu kommt, dass beim Testgerät bei speziellen Tasten vermutlich Kontaktprobleme auftraten, so dass des Öfteren Knopfdrücke ohne Reaktion blieben.
Positiv ist anzumerken, dass sich die umfangreichen Funktionen und die Vielzahl darstellbarer Parameter einzeln aktivieren lassen. Über die 5 gespeicherten Benutzerprofile, von denen zwei für Radfahrer ausgelegt sind, können leicht Einstellungen für die jeweilige Nutzergruppe vorgenommen werden, so dass nur die jeweils interessanten Informationen eingeblendet werden.

Der barometrische Höhenmesser sorgt für gleichmäßige Höhenprofile und weist bei Höhenunterschieden von bis zu 20 m kaum Unsicherheiten auf. Gleichzeitig kommt es auch bei größeren relativen Höhen nur zu sehr geringen Abweichungen zur Sollhöhe.
In Bezug auf die Strecken- und Geschwindigkeitsmessgenauigkeit muss zwischen Fahrradfunktion und anderweitiger Nutzung mit dem RDS unterschieden werden.

RDS
Den Herstellerangaben zufolge werden mit der auf Radarwellen basierenden Messmethode in der Regel 99 % Genauigkeit erreicht. Um diese erreichen zu können, ist allerdings eine Kalibrierung des eigenständig nutzbaren RDS erforderlich. Für die Tests wurde zur Präzisionssteigerung ein Kalibrierungslauf über eine 1000 m lange Strecke durchgeführt. Da sich ein Maßstabsfaktor von genau 1 ergab, hatte er keinen Einfluss auf die später angezeigten Distanzen. Die Qualität der Messungen ließ sich in diesem Fall folglich nicht weiter durch eine Kalibrierung verbessern.
Die Genauigkeiten der Streckenmessungen betragen durchschnittlich etwa 92-97 %. Bei Tests mit verschiedenen Laufstilen haben sich sehr heterogene Ergebnisse gezeigt. Für Walking ist das RDS mit mittleren 94 % besser geeignet, während etwa bei großen Schrittweiten nur 32 % Genauigkeit erreicht werden konnten. Des Weiteren hat sich

bestätigt, dass das RDS bei einer seitlichen Ausrichtung nicht sinnvoll eingesetzt werden kann.

Fahrradcomputer

In erster Linie ist der HAC5 ein multifunktionaler Fahrradcomputer. Der Lieferumfang ist dem entsprechend gestaltet. Bei den Tests wurde die Exaktheit der Entfernungsmessungen auf zwei unterschiedlichen Strecken überprüft. Als Ergebnisse sind Genauigkeiten im Bereich zwischen 96 % - 100 % festzuhalten. Die durchschnittlichen Werte liegen bei etwa 98 %.

Zusätzlich ist als Kritikpunkt anzuführen, dass die angezeigten Werte auf dem Display des HAC5 zum Teil von den aufgezeichneten Werten abweichen. Dieses Verhalten macht sich speziell wegen der hohen Geschwindigkeiten bei der Nutzung als Fahrradcomputer negativ bemerkbar. Werden die gefahrenen Strecken den Aufzeichnungen der Uhr entnommen, so lassen sich die Genauigkeiten um etwa 1 % steigern, da diese die Sollstrecken besser darstellen als die verzögerte Anzeige des HAC5.

4.6 Polar S625X

Hersteller:	POLAR
Bezeichnung/Modell:	S625X
Eingesetzte(s) Messverfahren:	Beschleunigungssensor, Barometrische Höhenmessung
Funktionen:	Distanz, Geschwindigkeit, Höhe, Kalorienverbrauch, Puls, Uhrzeit/Datum, Stoppuhr, Alarmfunktion, Rundenfunktion, Zielzonenfunktion mit Alarm, Temperatur, Trainingsprogramme
Maße (BxHxT):	47 x 54,3 x 15 mm
Gewicht:	58 g
Lieferumfang:	S625X, Pulsmesser (Brustgurt), Laufsensor S1, Handbuch (Deutsch), Software CD (Polar Pro Trainer)
Akkulaufzeit:	ca. 2 Jahre
Preis:	ca. 380.- €

4.6.1 Gerätebeschreibung

Die Polar Sportuhr ist baugleich als S725X als Fahrradcomputer oder als S625X als Laufsportuhr in zwei Ausstattungssets erhältlich. In diesem Test wird ausschließlich die S625X untersucht. Neben der Sportuhr und einer 128 seitigen Bedienungsanleitung gehören sowohl Brustgurt für die Pulsmessung, der Beschleunigungssensor S1 in Form eines Foot Pods als auch eine Software-CD zum Lieferumfang.

Die S625X dient als Empfänger und wird als Armbanduhr getragen. Das Armband besteht aus Polyurethan und die Uhr selbst ist aus Polykarbonat und Glasfieber. Durch Verwendung dieser Materialien ist der Sportcomputer bis 30 m wasserbeständig und kann somit auch beim Schwimmen getragen werden, wenn unter Wasser die Knöpfe nicht betätigt werden. Neben einem Thermometer ist auch ein Barometer direkt als zusätzlich Sensor in der Uhr integriert, um Höheninformationen nach dem Prinzip der

barometrischen Höhenmessung zu ermöglichen. Ihre Energie bezieht sie aus einer eingebauten Batterie, die bei einer Benutzung von täglich 2 Stunden laut Herstellerangaben eine Lebensdauer von ca. 2 Jahren aufweist. Die 58 g schwere Uhr besitzt ein etwa 2,5 x 2,5 cm großes Monochrom-Display, auf dem standardmäßig die Uhrzeit sowie der aktuell ausgewählte Benutzer angezeigt werden und lässt sich anhand von 5 Knöpfen vollständig bedienen. Über 4 Hauptmenüs (File, Options, Tests, Connect) können die Grundfunktionen der S625X betätigt werden. Durch das Drücken der roten Starttaste wechselt das Gerät vom Standardmodus in den Aufzeichnungsmodus. Nun kann zwischen verschiedenen Anzeigen umgestellt werden, welche jeweils unterschiedliche Informationen über den Trainingslauf darstellen. Dazu gehören Stoppuhr, Rundenzeit, Uhrzeit, Puls, aktuelle Geschwindigkeit, zurückgelegte Distanz, Höhe, überwundene Höhenmeter, Temperatur, Kalorienverbrauch, aber auch minimale, maximale sowie Durchschnittsgeschwindigkeit. Die Anzeigegenauigkeit beträgt bei der Geschwindigkeit 1/10 km/h, also eine Nachkommastelle (bzw. 2 bei einer Pace-Anzeige) und bei der Entfernung 10 Meter (2 Nachkommastellen bei km-Darstellung). Abweichend von der Darstellungsgenauigkeit werden die Distanzwerte hingegen mit Meter-Genauigkeit abgespeichert.

Die Daten werden in 5-, 15- oder 60-Sekunden-Intervallen mit Gesamtaufzeichnungsdauern von 10:54, 32:42 bzw. 99:59 Stunden gespeichert und können nach dem Lauf mittels Infrarot-Schnittstelle auf den PC übertragen und dort ausgewertet werden. Als besondere Funktion kann die Armbanduhr die Daten auch per Infrarot an einige Nokia-Handys übertragen, auf denen die Informationen gespeichert oder auch Trainingszusammenfassungen per SMS z.B. an den Trainer verschickt werden können. Anzumerken ist, dass keine Koordinaten abgespeichert werden, da der Beschleunigungssensor nur eine relative Messmethode darstellt und keinen Bezug zur absoluten Orientierung im Raum herstellen kann. Für verschiedene Benutzer lassen sich persönliche Daten und Trainingszielzonen für Geschwindigkeit und Herzfrequenz festlegen. 5 abgespeicherte Trainingsabläufe (Tests) sowie mit dem Gerät durchführbare Fitnesstests (Ermittlung der maximalen Sauerstoffkapazität und Herzfrequenz) vervollständigen den Funktionsumfang.

Der Pulsmesser besteht aus einem Gurt und einem abtrennbaren Sensor, in welchem sich auch eine CR-Knopfbatterie befindet, die mit einer angegebenen Lebensdauer von 2 Jahren bei einer täglichen einstündigen Nutzung ausgestattet ist. Per codiertem Funk werden die ermittelten Daten an den Armbandempfänger übertragen. Die Sendeeinheit wiegt inklusive Batterie 70 g und hat eine Größe von 4,36 x 8,34 x 3,21 cm, während der Brustgürtel für einen Umfang von etwa 65-88 cm ausgelegt ist und ein Gewicht von 70 g aufweist.

Für die Geschwindigkeits- und Entfernungsmessung ist der Laufsensor S1 in diesem Set von grundlegender Bedeutung. Ausgestattet mit einer AAA-Batterie (ca. 20 Betriebsstunden) wird der Foot Pod mit einer speziellen Halterung an den Schnürsenkeln eines Schuhs befestigt. Anhand von Beschleunigungsmessungen in zwei Richtungen werden Informationen über die einzelnen Schrittlängen und aufsummiert

über die Gesamtdistanz bzw. unter Beachtung der Zeit über die Laufgeschwindigkeit gewonnen. Das Funktionsprinzip ist in Abschnitt 2.4.3 geschildert. Auch der Laufsensor überträgt seine Daten über Funk an die Armbanduhr, an welcher die Informationen ausgewertet, angezeigt und gespeichert werden können.

4.6.2 Bedienung

Für den ersten Gebrauch der S625X ist die Bedienungsanleitung unerlässlich. Das 128 Seiten umfassende, komplett auf Deutsch geschriebene Handbuch ist sehr umfangreich und beschreibt anschaulich anhand vieler Bilder den Umgang mit der Sportuhr. Es ist sowohl für das Laufset (S625X) als auch für die Fahrradvariante (S725X) mit der funktionsgleichen Sportuhr ausgelegt. Die verschiedenen Pakete unterscheiden sich nur in unterschiedlichen Zubehörausstattungen. Die Anleitung ist generell für beide Varianten gültig. Angaben, welche sich auf nur eine spezielle Funktion des Sportcomputers beziehen, sind in der Anleitung farblich markiert und somit gut auseinander zu halten (bei der Lauf-Funktion blaue Schrift, beim Fahrrad hingegen schwarze Schrift mit grauer Hinterlegung). Für den ersten Einsatz müssen ca. 60 Seiten gelesen werden, um die Grundfunktionen des Geräts nutzen zu können. Speziell die Menüführung erscheint anfangs etwas kompliziert. Ist das Prinzip der Bedienung erst einmal verstanden, lassen sich die gewünschte Optionen schnell und einfach vornehmen.
Im Abschnitt „Erste Schritte“ am Anfang wird gezeigt, wie Brustgurt und Laufsensor bzw. die Fahrradsensoren angebracht werden müssen, um ordnungsgemäß zu arbeiten. Der Laufsensor besitzt an seiner Unterseite eine lösbare Haltevorrichtung, welche unkompliziert unter den Schnürsenkel geschoben wird und dann eingerastet werden muss. Durch diese Anbringung sitzt der Beschleunigungsmesser sehr stabil am Schuh und wackelt auch beim Laufen aufgrund von guter Befestigung kaum. Störeinflüsse durch zufällige seitliche Bewegungen werden somit minimiert. Da zum Berechnen der einzelnen Schrittlängen mittels Beschleunigungsmessungen mathematische Modelle eingesetzt werden, welche sich auf einen Durchschnittslaufstil beziehen, sollte mit Hilfe einer Kalibrierung der eigene Laufstil rechnerisch an das Modell angepasst werden, um höchste Genauigkeiten erzielen zu können. Dies geschieht über einen Kalibrierungslauf einer Strecke bekannter Länge über mindestens 1200 Meter. Aus dem Verhältnis der angezeigten Ist-Strecke zur Sollstrecke ergibt sich ein Kalibrierungsfaktor, welcher direkt an der S625 eingestellt werden kann. Die zukünftig gelaufenen Strecken werden dann automatisch um den Maßstabsfaktor korrigiert (siehe Abschnitt 2.4.4).
Zum Anlegen des Brustgurts muss die Sendeeinheit an beiden Enden des Gurtes verbunden werden. Dies geschieht mit einer speziellen Einrastetechnik, welche z.T. Schwierigkeiten beim Befestigen oder nach dem Training auch beim Lösen des Verschlusses bereitet. Insgesamt hält die Verbindung sehr gut und löst sich nicht unbeabsichtigt während des Laufens.
Sind die persönlichen Daten eingegeben und alle Sensoren angelegt, lässt sich eine Aufzeichnung mit einem Druck auf die rote Taste starten. Die Uhr sucht nun

selbstständig nach den Sensoren. Falls dabei Probleme auftreten sollten, etwa wenn das Anstellen des Laufsensors vergessen wurde, gibt die S625X eine Warnmeldung (CHECK SENSOR) aus. In der Standardansicht werden automatisch nacheinander alle interessanten Informationen angezeigt. Mittels der beiden rechten Knöpfe lassen sich aber auch einzelne Informationen aufrufen bzw. 2 verschiedene Werte übereinander anordnen, wobei der Puls immer als zusätzlicher Parameter im unteren Teil des Displays angezeigt wird.
Ein weiterer Druck auf die rote Start-Taste setzt eine Markierung für eine neue Runde. Die Lap-Zeit wird dann zurückgesetzt und beginnt mit der Zählung wieder bei Null. Anhand der gespeicherten Daten lässt sich bei einer späteren Auswertung ebenfalls die Rundenmarkierung erkennen, um weitergehende Analysen zu erlauben.
Die Auswertesoftware Polar ProTrainer 5 für den PC bietet zahlreiche Analysemöglichkeiten. Sie ist besonders dafür geeignet, das Trainingsprogramm für die nächsten Tage zu planen, was auch an einem großen Kalender mit bereits absolvierten und geplanten Trainingsläufen als Startbildschirm bei einem Programmaufruf deutlich wird. Sie besitzt eine Tagebuchfunktion, um für jeden Tag die eigenen Fitnesswerte und zusätzliche Informationen wie beispielsweise das Wetter oder die Anzahl der Schlafstunden zu speichern. Wie in Abbildung 331 zu sehen ist, erfolgen die Analysen der Läufe nach der Übertragung der Daten von der Uhr per Infrarot auf den PC anhand grafischer Darstellungen. Das Programm bietet weiterhin die Möglichkeit, verschiedene Maßeinheiten ineinander umzurechnen.

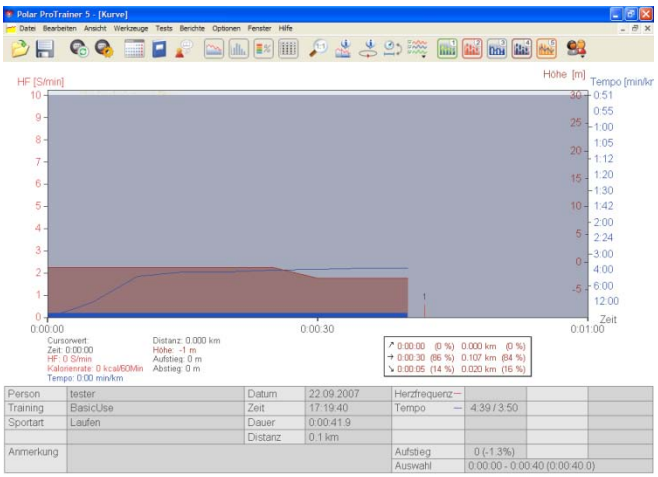


Abbildung 331: Polar ProTrainer 5

4.6.3 Tragekomfort

Das Tragen der Polar S625X ist recht angenehm, obwohl der Übergang zwischen Uhr und Armand einen etwas schlecht verarbeiteten Eindruck erweckt. Der Armbandempfänger ist mit 58 g recht leicht und sitzt gut auf dem Arm. Durch das Armband kommt es während des Laufens nicht zum Verrutschen der Uhr. Auch die beiden Sensoren lassen sich gut am Oberkörper bzw. am Schuh befestigen. Der elastische und in der Länge verstellbare Gurt passt sich gut dem Körper an. Die vollständige Ausrüstung (Uhr, Laufsensor und Pulsmesser) hat insgesamt ein Gewicht von 187 g, wobei mit 70 g der größte Anteil vom S1 beigetragen wird. Durch die Anbringung auf dem Schuh wird sein Gewicht allerdings nicht wahrgenommen.

4.6.4 Messprinzip Beschleunigungssensor

Teststrecke 1.0

Das Laufset von Polar wurde zunächst unter optimalen Bedingungen auf Teststrecke 1.0 einer Genauigkeitsuntersuchung unterzogen. Der feste Untergrund aus Teer stellt einen typischen Lauf auf einer Straße dar. Ein geringer Höhenunterschied von nur 1-2 m über die gesamte Strecke von 500 m und die gerade Strecke ohne Kurven ermöglichen einen Test unter Referenzbedingungen, da eine große Anzahl von Störeinflüssen auf diese Weise unterdrückt wird. Die am Ziel auf der Uhr angezeigten Strecken sind in folgender Grafik veranschaulicht:

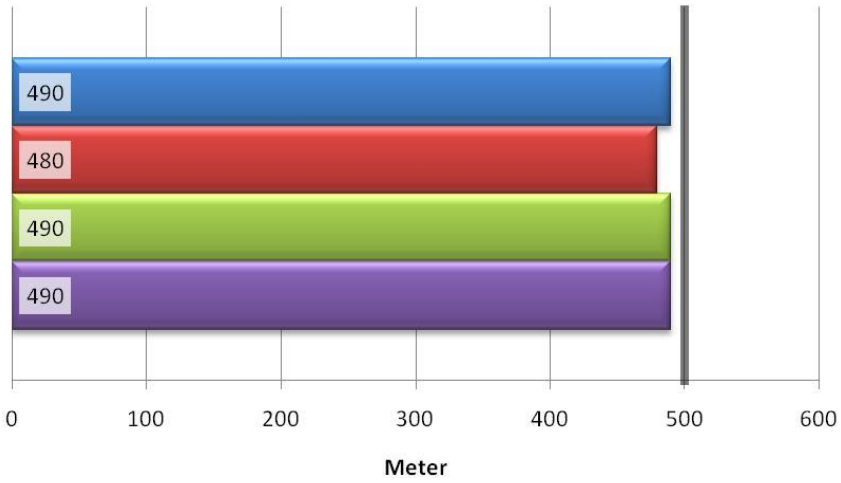


Abbildung 332: Teststrecke 1.0 - angezeigte Strecken (Sollstrecke 500 m)

Es ist auffällig, dass alle Distanzen ca. 10 bzw. einmal 20 m zu kurz angezeigt werden. Der Mittelwert der vier Messungen beträgt 487,5 m, wobei die Standardabweichung von 5,0 m für eine sehr gute Wiedereinstellgenauigkeit spricht.
Den Herstellerangaben zufolge lassen sich mit dem Foot Pod S1 bei konstanten Bedingungen Genauigkeiten von ±3 % bei einem unkalibrierten Gerät und noch geringerer Abweichungen nach erfolgter Kalibrierung erzielen. Die Tests wurden zunächst ohne Kalibrierung durchgeführt. Die separate Ermittlung des Kalibrierungsfaktors auf einer 1600 Meter langen Strecke für die Berücksichtigung bei der Auswertung ergab genau 1. Die Position des Sensors am Schuh wurde für die Dauer der gesamten Tests nicht verändert, wodurch der Maßstabsfaktor konstant bleibt und keine Auswirkungen auf die ermittelten Strecken mit sich bringt. Insgesamt sollten die Abweichungen folglich 3 % nicht überschreiten.
Der schlechteste hier aufgetretene Wert ist 480 m und liegt somit unter den geforderten 3 % bzw. 485 m, der Mittelwert aller vier Läufe liegt hingegen innerhalb des Toleranzbereichs. Auf Grund der Anzeigegenauigkeit der S625X werden Strecken nur auf zehn Meter genau dargestellt, aber mit Metergenauigkeit abgespeichert. Daher ist ein Vergleich zwischen den angezeigten Distanzen aus dem Feldbuch und den Streckeninformationen aus den Dateien interessant.

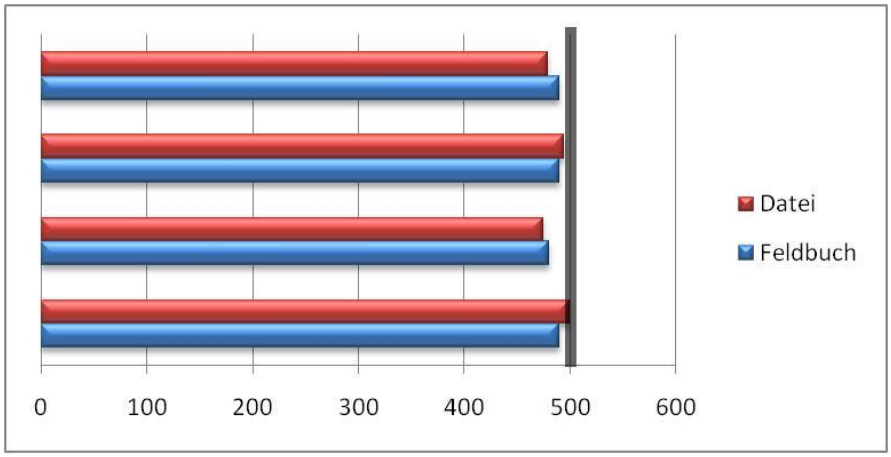


Abbildung 333: Teststrecke 1.0 – Vergleich angezeigte und aufgezeichnete Strecken

Es wird deutlich, dass sich wegen der differierenden Darstellungsgenauigkeiten die angezeigten Strecken von denen in den Dateien leicht unterschieden. Der maximale Unterschied ist mit 11 m beim untersten Lauf aufgetreten, was bei einer Sollstrecke von 500 m schon einem Fehler von 2,2 % entspricht. Zudem sind die gespeicherten Strecken bei zwei Läufen kürzer und bei den anderen beiden länger als die angezeigten Werte.

Feldbuch [m]	490	480	490	490
Datei [m]	499	475	494	479

Anhand der aufgelisteten Strecke ist noch keine Systematik hinsichtlich des geräteinternen Rundungsalgorithmus bei der Anzeige zu erkennen. Während die beiden mittleren Werte für das einfache Auf- bzw. Abrunden sprechen, deutet der erste Wert eher auf ein Abschneiden des Einerwertes auf volle 10 m hin. Das letzte Zahlenpaar lässt sich mit keiner der beiden genannten Varianten vereinen. Daher müssen Messerergebnisse anderer Läufe (s.u.) untersucht werden, um eine mögliche Systematik feststellen zu können.
Neben der ermittelten Strecke sind auch die Geschwindigkeiten von Bedeutung. Während der Testdurchführung wurde bestmöglich auf eine einheitliche Geschwindigkeit geachtet, folglich sollte der Geschwindigkeitsverlauf möglichst gleichmäßig sein und wenig variieren. Der Polar S1 ermittelt anhand der auf den Fuß wirkenden Beschleunigungen die aktuelle Geschwindigkeit und errechnet daraus anschließend den zurückgelegten Weg. Aus diesem Grund ist eine ordnungsgemäße Geschwindigkeitsermittlung maßgeblich entscheidend für die spätere Distanz und muss daher genau bestimmt werden.

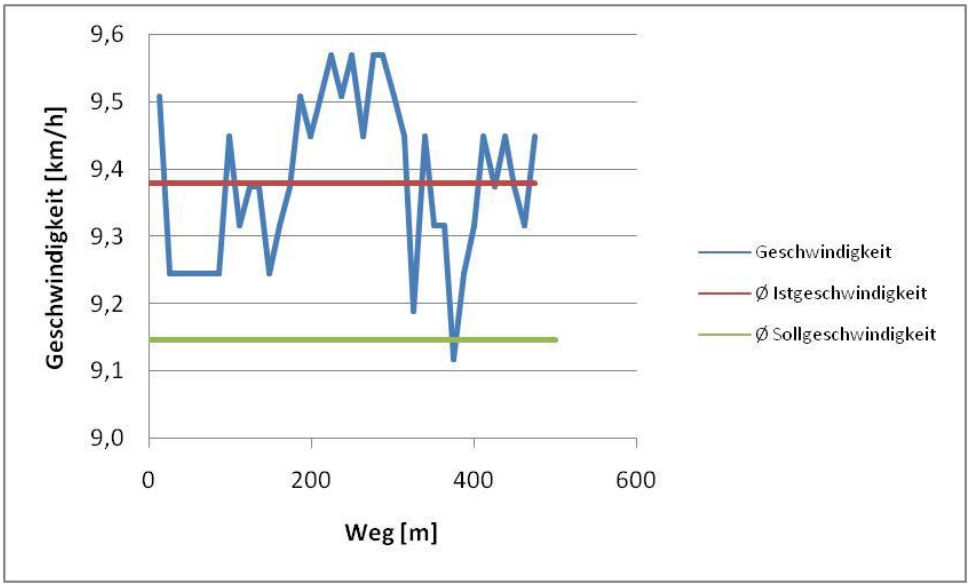


Abbildung 334: Teststrecke 1.0 – Geschwindigkeitsverlauf

In Abbildung 334 ist der Geschwindigkeitsverlauf der zweiten Messung dargestellt. Gut lässt sich erkennen, dass die Geschwindigkeit sehr konstant bleibt und nur in einem Intervall von ca. 0,5 km/h schwankt. Der Unterschied von 0,23 km/h zwischen Durchschnitts-Istgeschwindigkeit und Sollgeschwindigkeit lässt sich mit der um 25 m (Datei) von der tatsächlichen abweichenden Strecke begründen.

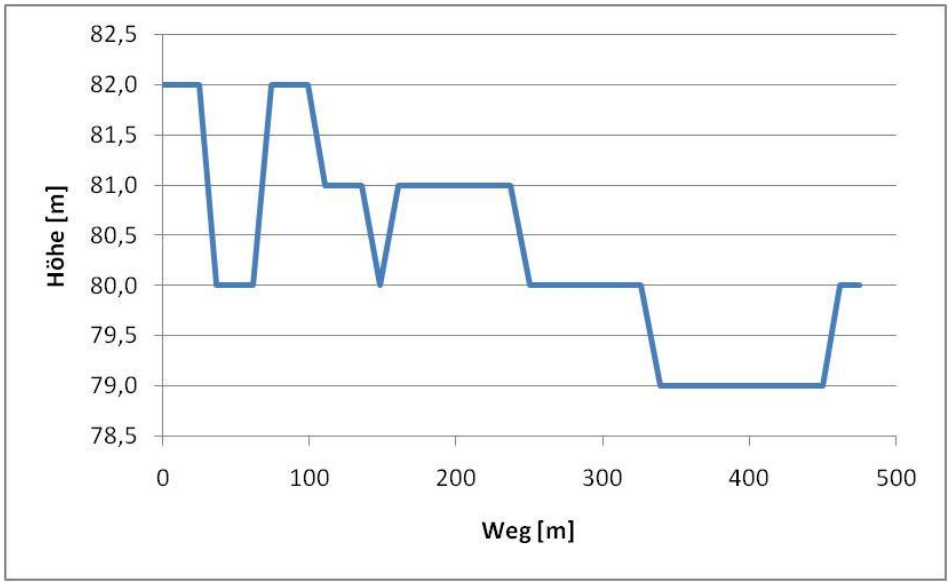


Abbildung 335: Teststrecke 1.0 - Höhenverlauf

Der Höhenverlaufes in Abbildung 335 stellt insgesamt gut den Höhenunterschied von 1,17 m zwischen Start- und Endpunkt dar. Beim S625X werden Höhenwerte auf 1 m genau angezeigt, zur Messgenauigkeit macht der Hersteller keine Angaben. Kleine Höhensprünge wie etwa die 2 m im Bereich zwischen 40 und 100 m Wegstrecke sind vermutlich auf die mangelnde Luftdruckmessgenauigkeit oder vorübergehende Luftdruckänderungen beispielweise durch kurzfristiges Abdecken des Luftdrucksensors beim Laufen zurückzuführen.

Teststrecke 2.1

Nahezu ideale Voraussetzungen bestanden auch auf Teststrecke 2.1. Die 1000 m lange Strecke hat wie Teststrecke 1.0 einen geraden Verlauf und nur einen Höhenunterschied von wenigen Metern. Neben der doppelt so langen Strecke besteht ein Unterschied im Untergrund. Anstatt Teer wird hier ein Lauf auf mittelfesten bis festen Schotter durchgeführt. Durch die abweichende Festigkeit im Vergleich zum harten Teer bei Teststrecke 1.0 kann sich der Laufstil leicht ändern. Die folgenden Strecken wurden dabei angezeigt:

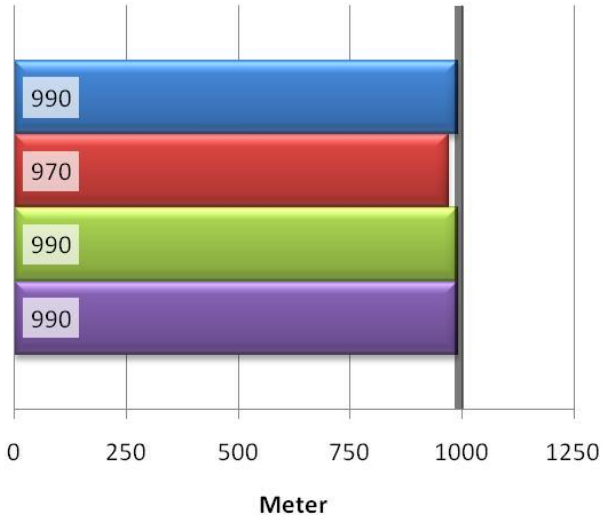


Abbildung 336: Teststrecke 2.1 - angezeigte Strecken

Auf den ersten Blick wird ersichtlich, dass die Genauigkeiten bei der 1000 m langen Strecke besser sind als bei der halb so langen Referenzstrecke. Der Mittelwert beträgt 185 m mit einer Standardabweichung von 10 m. Die schlechteste Strecke weicht um genau 3 % vom Sollwert ab, die anderen drei um 1 %. Der Test zeigt, dass die Distanzen auch über längere Strecken recht zuverlässig ermittelt werden. Zudem scheint sich der etwas weichere Untergrund positiv auf die Genauigkeit auszuwirken. Vermutlich wurde das mathematische Modell zur Rekonstruktion der Schrittlänge anhand der Fußbeschleunigungen auf der Grundlage vieler verschiedener Testpersonen bei unterschiedlichen Untergrundtypen erstellt. Der mittelharte Schotter dieser Teststrecke scheint gut dem Untergrund zu entsprechen, für das der S1-Sensor hauptsächlich ausgelegt ist.

Der Vergleich zwischen den angezeigten Distanzen der S625X und denen aus den Dateien führt zu folgenden Ergebnissen:

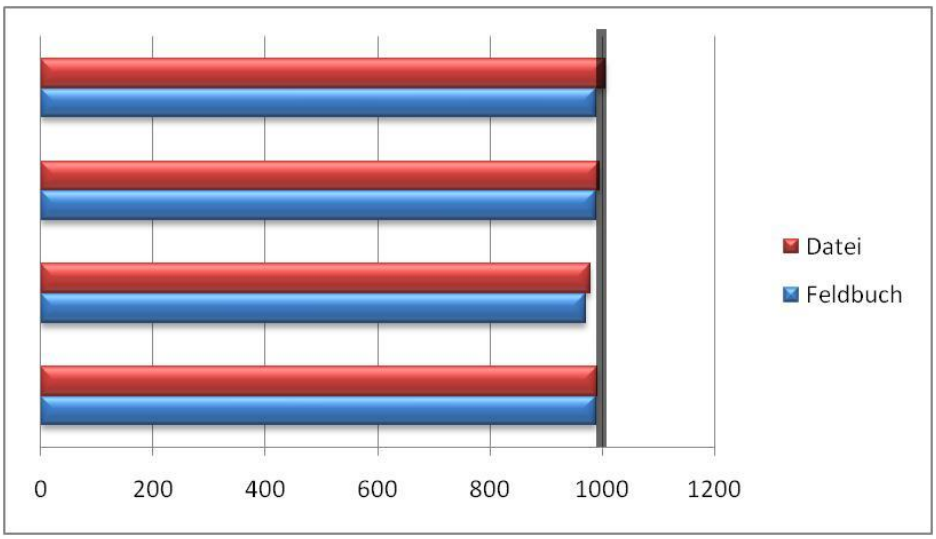


Abbildung 337: Teststrecke 2.1 – Vergleich angezeigte und aufgezeichnete Strecken

Feldbuch [m]	990	990	970	990
Datei [m]	1005	995	980	992

Auch dieses Mal gibt es wieder Abweichungen zwischen den abgelesenen und abgespeicherten Werten, allerdings sind die in der Datei gespeicherten Distanzen bei allen Messungen etwas größer als die angezeigten Strecken. Diese Situation legt die Vermutung nahe, dass die Anzeige etwas zeitlich verzögert ist. In Bezug auf das Rundungsverhalten lässt sich anhand dieser Werte erneut keine Aussage treffen. Sollte die Anzeige tatsächlich verzögert erscheinen, könnten sich eventuell die gerundeten angezeigten Werte auf zeitlich gesehen frühere Werte aus der Datei beziehen. Die beiden Läufe von Teststrecke 1.0, bei denen die dargestellte Distanz größer war als diejenige in der Datei, sprechen allerdings gegen diese These.
Der Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 338 ist prinzipiell sehr konstant und befindet sich hauptsächlich in einem Intervall von ca. 0,5 km/h. Auffällig sind drei Ausreißer, bei denen das Tempo auf etwa 8,5 km/h kurzfristig abfällt. Sie dauern maximal 1 bis 3 Aufzeichnungspunkte an, was bei einem 5 s Speicherintervall einem Zeitraum von 5 bis 15 Sekunden entspricht.

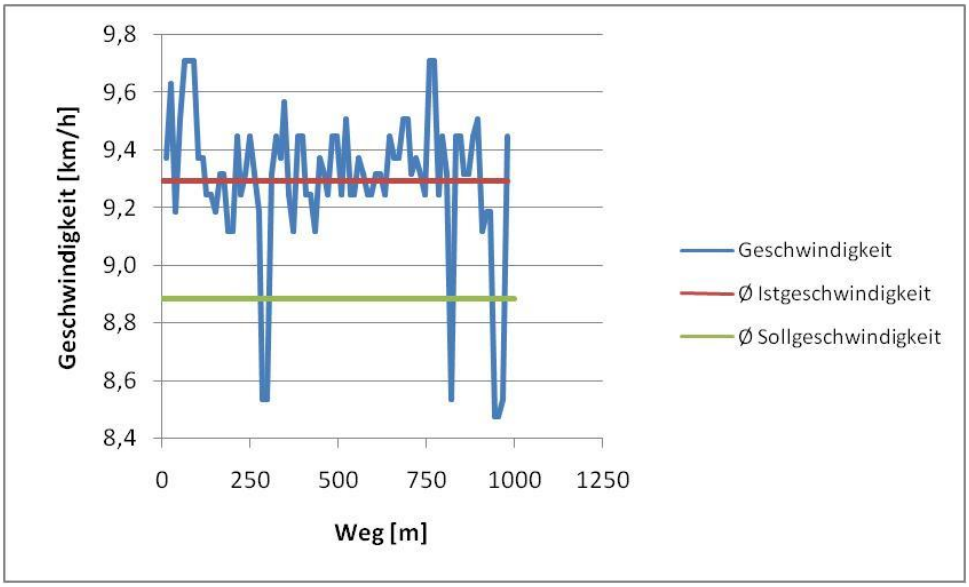


Abbildung 338: Teststrecke 2.0 – Geschwindigkeitsverlauf

Für die Ausreißer kommen zwei verschiedene Begründungen in Betracht. Entweder konnten während des Laufs die Geschwindigkeiten nicht gleich bleibend gehalten werden, oder es liegen Fehlmessungen des Laufsensors vor. Da 0,8 km/h Abweichung zur Durchschnittsgeschwindigkeit für fehlerhafte Messungen noch relativ gering ist, ist hierbei wohl eher die tatsächlich gelaufene Geschwindigkeit für das Verhalten verantwortlich. Die kurzzeitigen Ausreißer deuten folglich darauf hin, dass der Sportcomputer keine starke Filterung der Messergebnisse in Bezug auf Ausreißer aufweist. Die Daten werden stichprobenartig je nach eingestelltem Speicherintervall im besten Falle alle 5 s aufgezeichnet. Der Filter ist somit zunächst nur zeitlich bedingt. Auf Teststrecke 10.0 wird sich durch den Test „plötzliches Anhalten“ später zeigen, in wie weit die Daten z.B. mit Hilfe einer Prädiktion oder eines Kalman-Filters vorausberechnet werden.

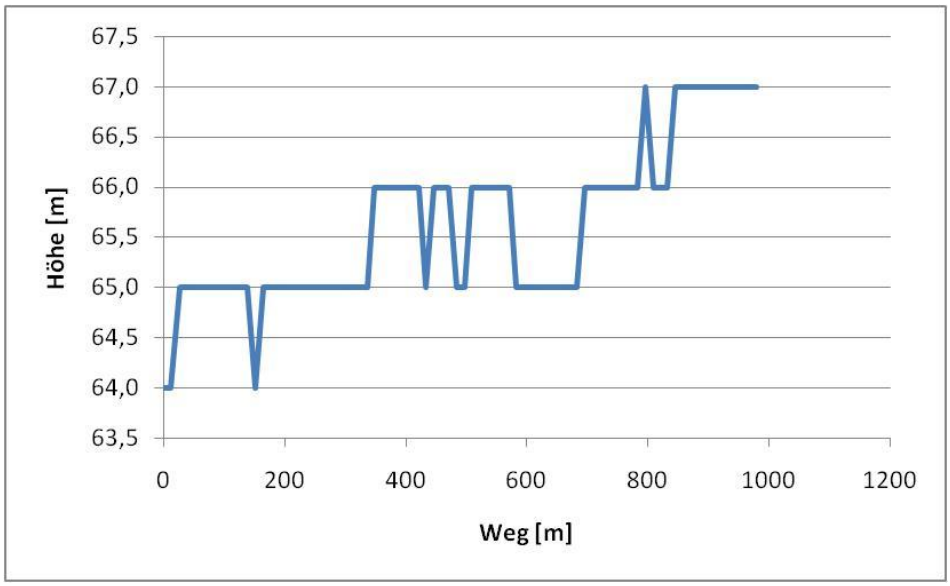


Abbildung 339: Teststrecke 2.1 - Höhenverlauf

Der Höhenverlauf auf dieser Teststrecke wurde mit der barometrischen Höhenmessung im Rahmen der Messgenauigkeit wieder präzise erkannt. Kleine Höhenschwankungen von einem Meter, welche auf Grund des Höhenauflösungsvermögens der S625X die kleinste darstellbare Genauigkeit bilden, sind typisch für diesen Sportcomputer. Haupteinflussparameter bei der barometrischen Höhenmessung sind nach Abschnitt 2.5 Temperatur und Luftdruck, welche beide genau bestimmt werden müssen, um die korrekte (Relativ-)Höhe ermitteln zu können. Geringe Temperaturschwankungen durch vorbeiziehende Luftmassen beim Laufen in Kombination mit der zusätzlichen Bewegung des Armes (das Thermometer befindet sich in der Armbanduhr) können somit kleine Höhenanzeigeänderungen hervorrufen, welche eventuell zum Zeitpunkt der nächsten Messung anders ausfallen, und die Höhe wieder korrigiert wird. Damit lassen sich die mehrmals auftretenden Höhenschwankungen erklären.

Teststrecken 6.0 und 7.0

Wie bereits beschrieben, scheint sich ein anderer Untergrund auf die Messergebnisse auszuwirken. Daher werden die Verhaltensweisen des Geräts auf den folgenden beiden Teststrecken 6.0 und 7.0 einerseits auf weichem, nachgebendem Rasen und andererseits auf einem aus lockerem Schotter bestehendem Feldweg zwei verschiedene Bodenarten geprüft.

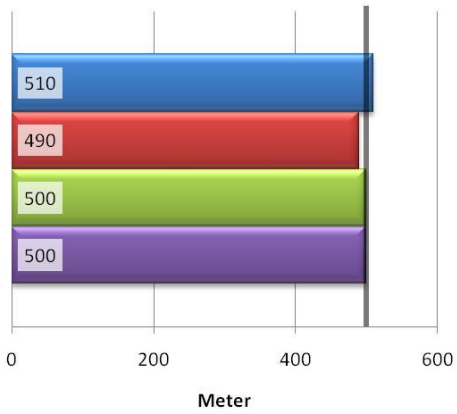


Abbildung 340: Teststrecke 6.0 (Rasen)

- angezeigte Strecken

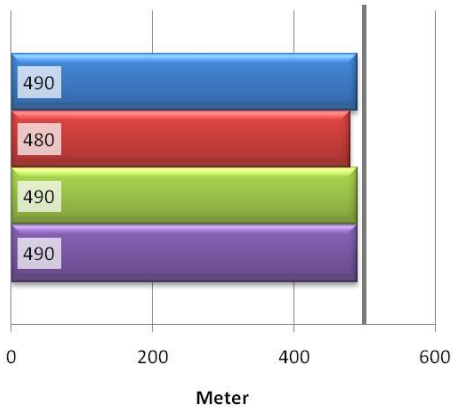


Abbildung 341: Teststrecke 7.0 (Schotter)

- angezeigte Strecken

Den beiden Abbildungen lassen sich die angezeigten Distanzen auf den Teststrecken 6.0 mit Rasen (Abbildung 340) und auf lockerem Schotter (Abbildung 341) mit jeweils einer Sollstrecke von 500 m erkennen. Der Mittelwert für den Rasen-Test beträgt 497,5 m (Standardabweichung 8,16 m), auf dem Feldweg hingegen 492,5 m mit nur 5 m Standardabweichung. Es lässt sich konstatieren, dass die Strecken auf weichem, nachgebendem Untergrund etwas größer angezeigt werden als auf einem mittelharten Feldweg. Weiterhin sind die erreichten Genauigkeiten auf diesem Untergrund mit durchschnittlich 99,5 % bezogen auf den Mittelwert und 98 % im schlechtesten Fall besser als die mittleren 98,5 % bzw. minimal 96 % bei Teststreck 7.0.

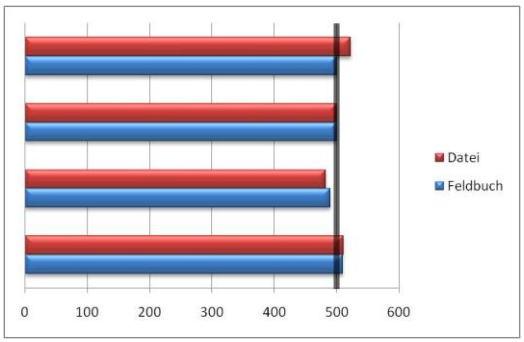


Abbildung 342: Teststrecke 6.0 (Rasen) – angezeigte und aufgezeichnete Strecken

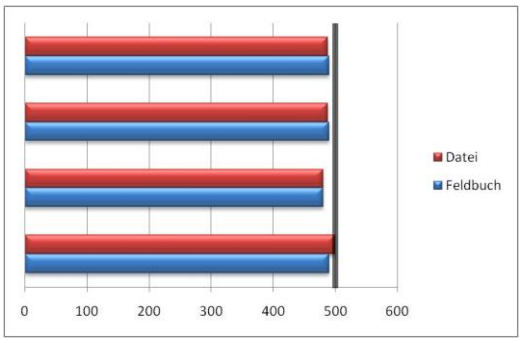


Abbildung 343: Teststrecke 7.0 (Schotter) – angezeigte und aufgezeichnete Strecken

Feldbuch [m]	500	500	490	510
Datei [m]	522	500	482	511

Feldbuch [m]	490	490	480	490
Datei [m]	488	488	480	499

Bei beiden Läufen treten zum Teil wieder Abweichungen zwischen den angezeigten und aufgezeichneten Strecken auf. Mit 22 m ist die erste Differenz beim Lauf auf Rasen auffallend groß, er entspricht einer Abweichung von 4,4 % zur Sollstrecke. Dieser Wert ist aber als Ausreißer anzusehen, da die anderen Zahlenpaare relativ gut zueinander passen. Er kommt durch die Verzögerung der Anzeige zu Stande, da sich der im Display abgebildete Wert vermutlich noch auf die 5 s zuvor gespeicherte Distanz von 493 m bezieht. Damit befände sich der Unterschied im für das Gerät üblichen Abweichungsintervall von bis zu 10 m. Abgesehen vom eben beschriebenen Ausreißer liegen hingegen insgesamt bei 5 Läufen die Werte aus der Datei und aus dem Feldbuch nur maximal 2 m auseinander. Die gespeicherten Strecken auf Teststrecke 6.0 haben einen Mittelwert von 503,75 m, was einer mittleren Abweichung von 0,75 % entspricht. Auf Schotter ergibt sich ein Durchschnittswert von nur 488,75 m (Abweichung 2,25 %). Auch in den aufgezeichneten Werten zeigt sich somit eine höhere Genauigkeit bei Messungen auf Rasen anstelle des Schotters.
Die Geschwindigkeiten bei beiden Strecken lassen sich schlecht miteinander vergleichen, da die verschiedenartigen Untergründe etwas andere Laufstile mit sich führen.

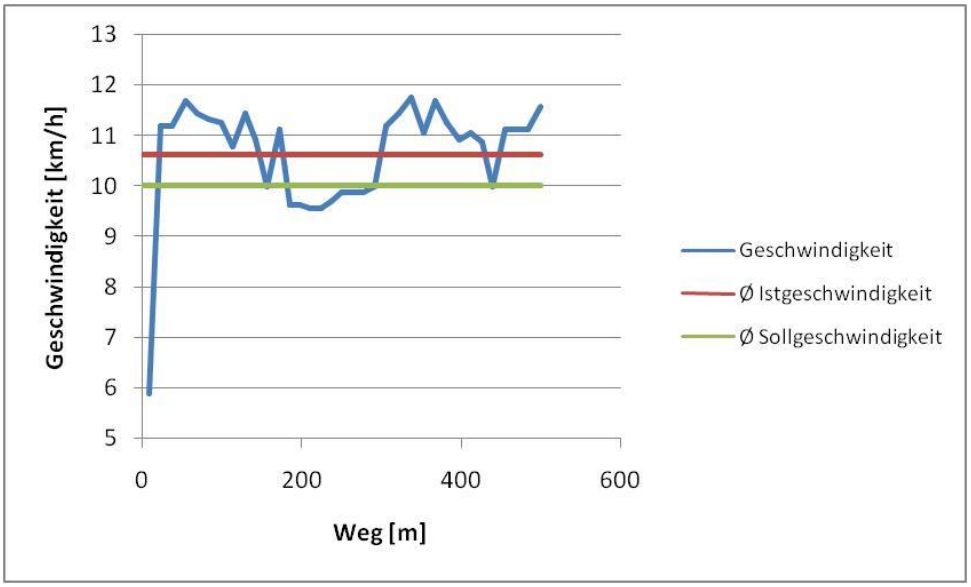


Abbildung 344: Teststrecke 6.0 (Rasen) - Geschwindigkeitsverlauf

Durch den ungleichmäßigen, nachgebenden Rasen war es schwierig, eine konstante Geschwindigkeit während des Laufes aufrecht zu erhalten. Die Schwankungen von über 2 km/h in Abbildung 344 sind dementsprechend etwas größer als jene auf dem begradigten und nur wenig nachgebenden Schotterfeldweg, wie in Abbildung 345 verdeutlicht ist. Nachdem sich nach ungefähr 100 m auf dem Weg eine einheitliche Laufgeschwindigkeit eingestellt hat, ist die Geschwindigkeit mit einem Variationsintervall von etwa 0,7 km/h recht gleichbleibend.

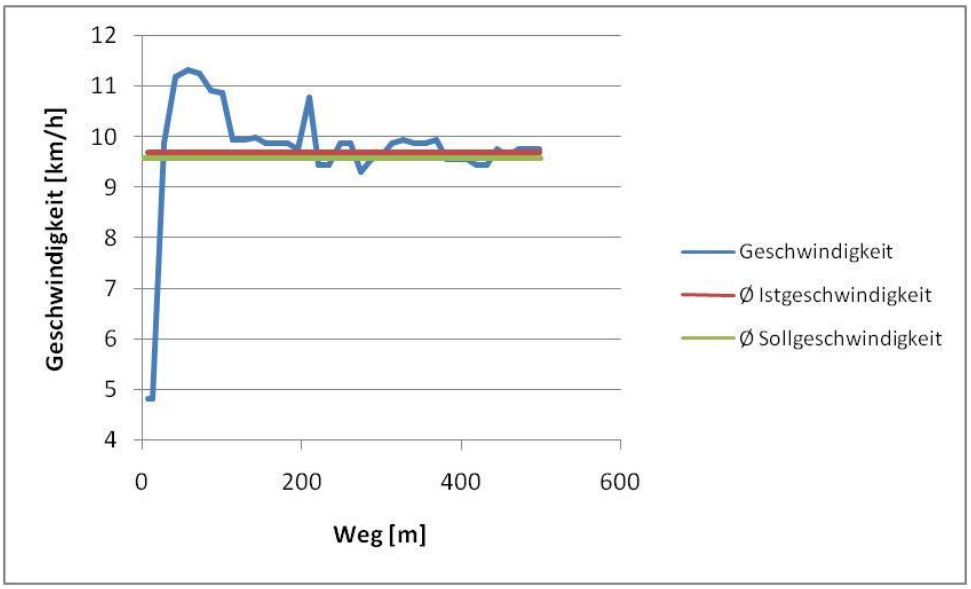


Abbildung 345: Teststrecke 7.0 (Schotter) - Geschwindigkeitsverlauf

Die beiden Teststrecken 6.0 und 7.0 verlaufen im Abstand von etwa 15 m parallel zueinander. Aufgrund des Geländes kann von ungefähr gleichen Höhenverläufen ausgegangen werden kann. Die jeweils aufgezeichneten Höhenprofile zeigen in der Tat einen ähnlichen Verlauf. Sie stellen gut den wirklichen Streckenverlauf dar: Nach dem Startpunkt ging es zunächst etwas bergab, dann kam eine leichte Erhebung (um die 100 m) und nach ungefähr 200 m folgt der allmähliche Anstieg von 2-3 Höhenmetern zum Ziel.

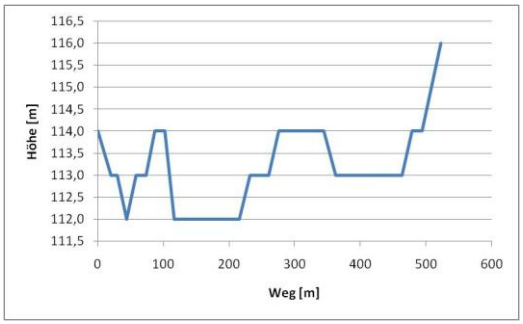


Abbildung 346: Teststrecke 6.0 (Rasen) - Höhenverlauf

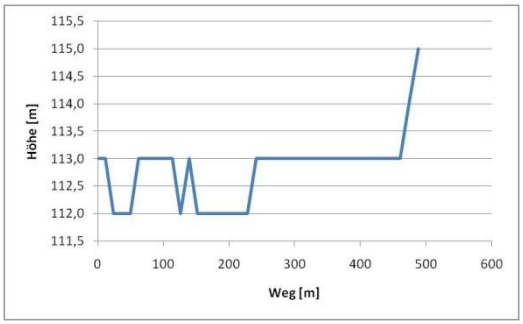


Abbildung 347: Teststrecke 7.0 (Schotter) - Höhenverlauf

Referenzstrecke 8.0

Nachdem die S635X bisher ausschließlich auf gerade verlaufenden Strecken getestet wurde, folgt mit Teststrecke 8.0 ein sehr kurvenreicher Weg. Besonders das Verhalten des Laufsensors während der Kurven ist hierbei von Interesse.

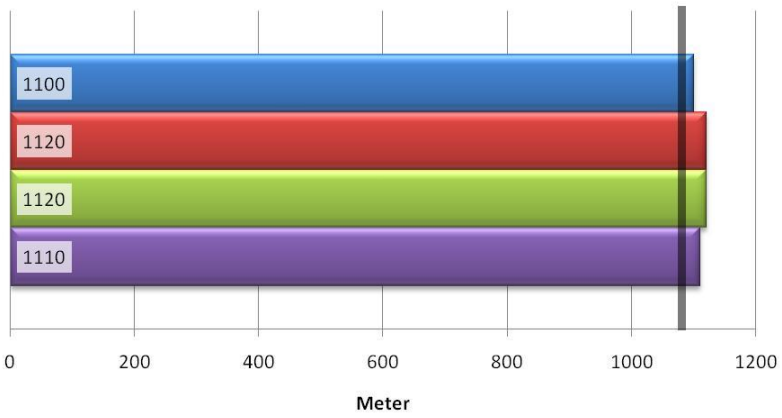


Abbildung 348: Teststrecke 8.0 - angezeigte Strecken (Sollstrecke 1081,8 m)

Im Vergleich zu den bisherigen Strecken werden hierbei zum ersten Mal durchgängig zu lange Strecken angezeigt (Abbildung 348). Der mit einer Standardabweichung von 9,57 m recht genau ermittelte Durchschnittswert beträgt 1112,5 m und liegt somit deutlich mit 30,7 m über der Sollstrecke. Selbst die kürzeste Distanz (1100 m) wird mit fast 20 m zu viel ausgegeben. Die Streckenmessgenauigkeit des Sensors beträgt im schlechtesten

Fall (1120 m) 103,5 %, sie ist als außerhalb des von Polar angegeben Bereichs von ± 3 %. Der Mittelwert hingegen liegt mit 2,87 % knapp innerhalb des genannten Intervalls.

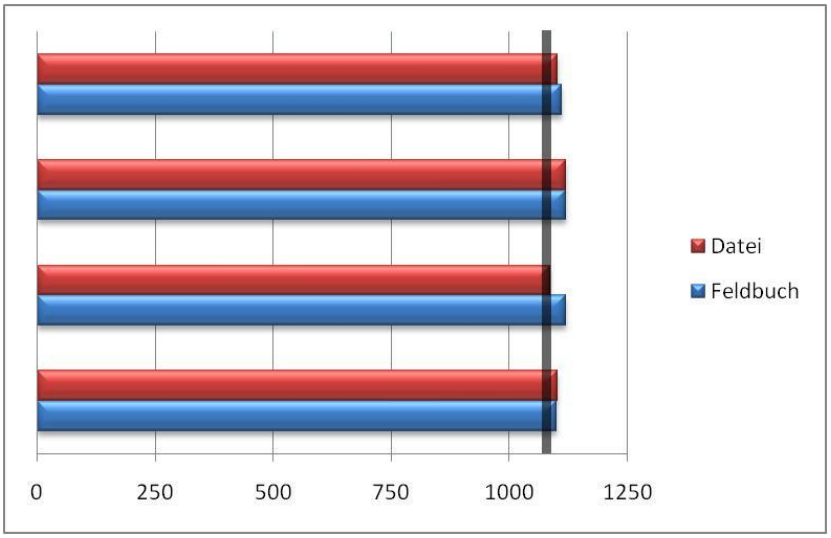


Abbildung 349: Teststrecke 8.0 – Vergleich angezeigte und aufgezeichnete Strecken

Feldbuch [m]	1110	1120	1120	1100
Datei [m]	1101	1120	1085	1102

Werden die angezeigten Strecken den aufgezeichneten Werten aus der Datei gegenübergestellt, so ist vor allem die Differenz von 35 m (1120 m – 1085 m) auffallend groß, während die anderen Werte liegen recht dicht beieinander liegen. Die 1085 m beschreiben zwar recht genau die Sollstrecke von 1081,8m, allerdings ist die aufgezeichnete Distanz in diesem Fall aufgrund der drei anderen deutlich höher liegenden Messergebnisse eher als Ausreißer anzusehen. Für die Werte aus der Datei ergibt sich ein Mittelwert von 1102 m und somit eine durchschnittliche Streckenabweichung von 1,87 %.
Zusammengefasst scheinen Kurven also zu einer Verlängerung der gemessenen Strecke zu führen. Dies lässt sich mit den bei Richtungsänderungen anders wirkenden Kräften auf den Fuß erklären. Beim Kurvenlauf beschreibt der Fuß keine exakte Bewegung in der Sagittalebene, sonder führt durch die Körperdrehung eine Bewegung nach schräg vorne aus. Wird eine runde enge Kurve schnell durchlaufen, so können zusätzlich auftretende Zentrifugalkräfte den Beschleunigungssensor zusätzlich stören.

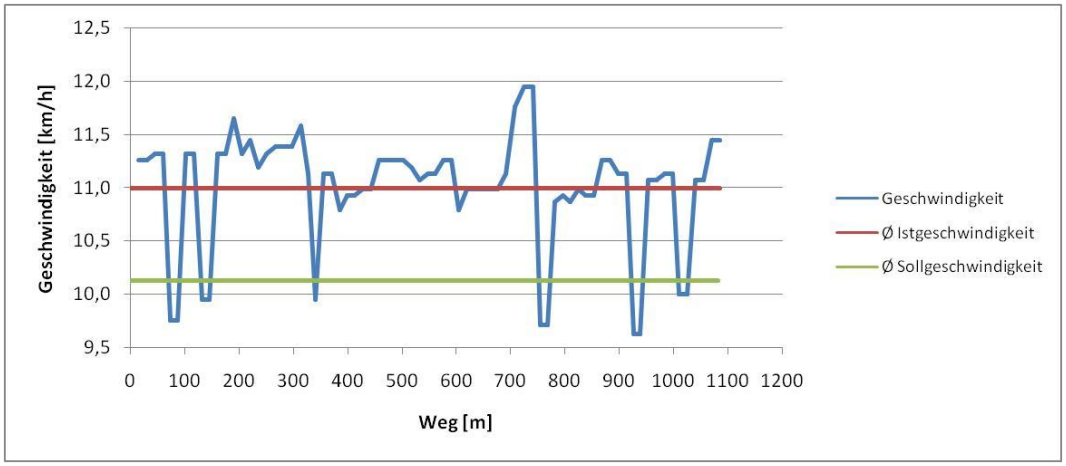


Abbildung 350: Teststrecke 8.0 - Geschwindigkeitsverlauf

Der Streckenverlauf auf dem EXPO-Gelände lässt sich anhand der Geschwindigkeitsentwicklung in Abbildung 350 gut nachvollziehen. In den Kurven wurden etwas geringere Geschwindigkeiten als auf geraden Wegabschnitten registriert. Der gezeigte Lauf beginnt am westlichen Startpunkt der Strecke 8.0. Nach ca. 75 m tritt eine Drehung um 90° auf, bei der die Geschwindigkeit von 11,32 auf 9,95 km/h abfällt. Kurz später bei etwa 130 m wird in einer 180°-Kurve abrupt die Laufrichtung gewechselt, was ebenfalls wieder eine Geschwindigkeitsabsenkung mit sich führt. Nach 330 m muss eine runde, sehr enge Kurve durchlaufen werden, danach folgen für längere Zeit hauptsächlich gerade Strecken. Diese Teilstücke sind über abgerundete, leichte Kurven miteinander verbunden und werden bei der Geschwindigkeitsmessung kaum auffällig registriert. Bei ungefähr 700 m führt die Strecke etwas bergab am Pavillon von Ungarn vorbei, wodurch eine Beschleunigung auftritt, während am Ende des Gefälles bei 755 m aufgrund einer scharfen Kurve die Geschwindigkeit stark abfällt. Auch die folgenden beiden Geschwindigkeitsminima können eindeutig den letzten beiden Kurven der Teststrecke zugeordnet werden.

Auch auf dieser Strecke ist die Geschwindigkeit insgesamt sehr gleichmäßig und bewegt sich in einem Intervall von 2,32 km/h. Die Minima in Abbildung 350 sind nur wegen des stark vergrößerten Maßstabs sichtbar. Die korrekte Zuordnung der langsamen Stellen zum tatsächlichen Streckenverlauf deutet auf eine gute Aufzeichnungsgenauigkeit der Geschwindigkeit hin. Der passende Höhenverlauf ist in Abbildung 351 veranschaulicht.

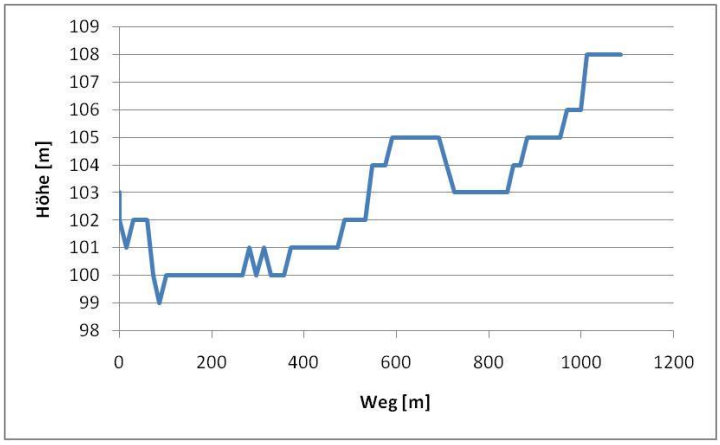


Abbildung 351: Teststrecke 8.0 - Höhenverlauf

Das Höhenprofil der Teststrecke wird auch hier recht genau gezeigt. Bei 80 m wurde eine ca. 3 m hohe Treppe absteigend zurückgelegt. Danach folgt ein stetiger Anstieg in Richtung Ziel. Zwischen 700 m (Ungarischer Pavillon) und 900 m wird verläuft die Strecke parallel zum Hang, so dass davor und danach jeweils ein kleiner 2 m hoher Ab- bzw. Anstieg zu verzeichnen ist.

Teststrecke 10.0

Anderer Anbringungsort

Befestigt man den Laufsensor S1 nicht wie vorgesehen flach, sondern etwas steiler auf dem Schuh (weiter oben, fast senkrecht an den Schnürsenkeln), so ergeben sich die auf Teststrecke 10.0 ermittelten Werte:

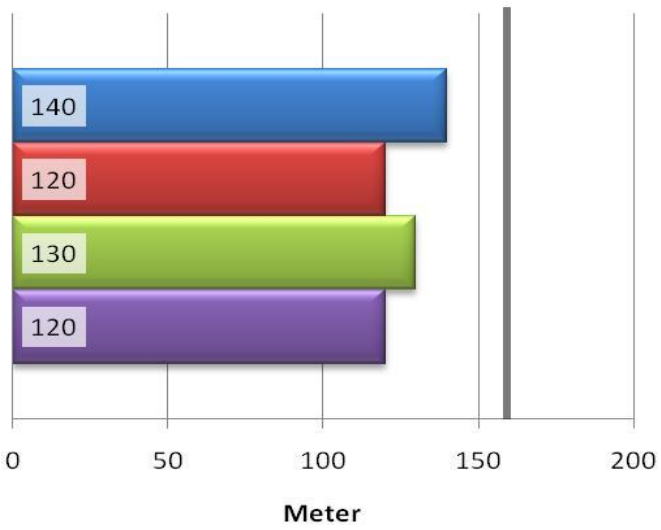


Abbildung 352: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken - anderer Anbringungsort

Wie in Abbildung 352 klar erkennbar ist, führt eine Befestigungsmethode des S1 in dieser Position zu sehr kurzen angezeigten Strecken. Der Mittelwert von nur 127,5 m liegt 31,9 m vom Sollwert 159,4 m entfernt. Die Genauigkeit des Durchschnittswertes bezogen auf die Sollstrecke beträgt nur 80 %, im Falle der schlechtesten

Einzelergebnisse mit 120 m sogar nur 75,3 %. Eine Standardabweichung des Mittelwerts von 9,57 m ist für diese kurze Strecke auch relativ hoch, aber mit der Anzeigegenauigkeit des Displays zu begründen.

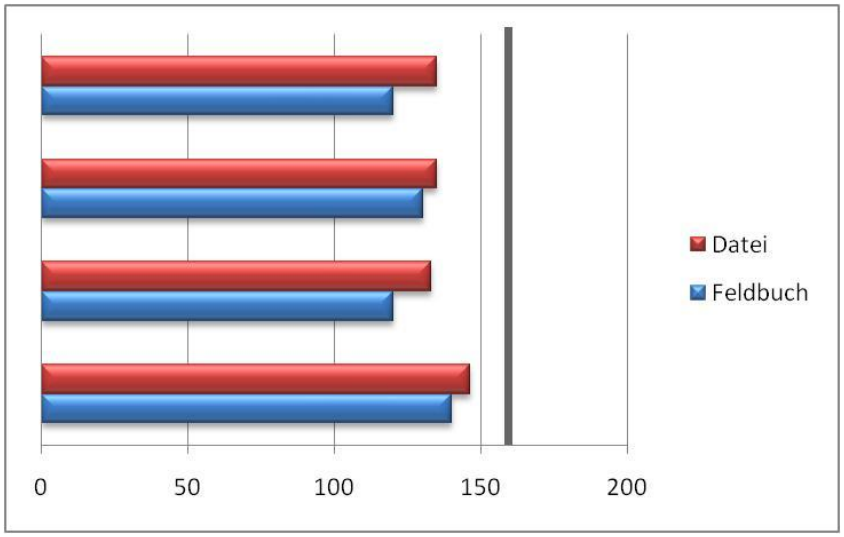


Abbildung 353: Teststrecke 10.0 – Vergleich angezeigte und aufgezeichnete Strecken anderem Anbringungsort

Bei diesem Test sind die in den Dateien gespeicherten Distanzwerte einheitlich größer als die Angezeigten. Folglich liegt der Mittelwert von 137,25 m auch wesentlich näher an der Sollstrecke, die Abweichung beträgt allerdings immer noch 13,9 %. Die entsprechende Standardabweichung berechnet sich zu 5,9 m.

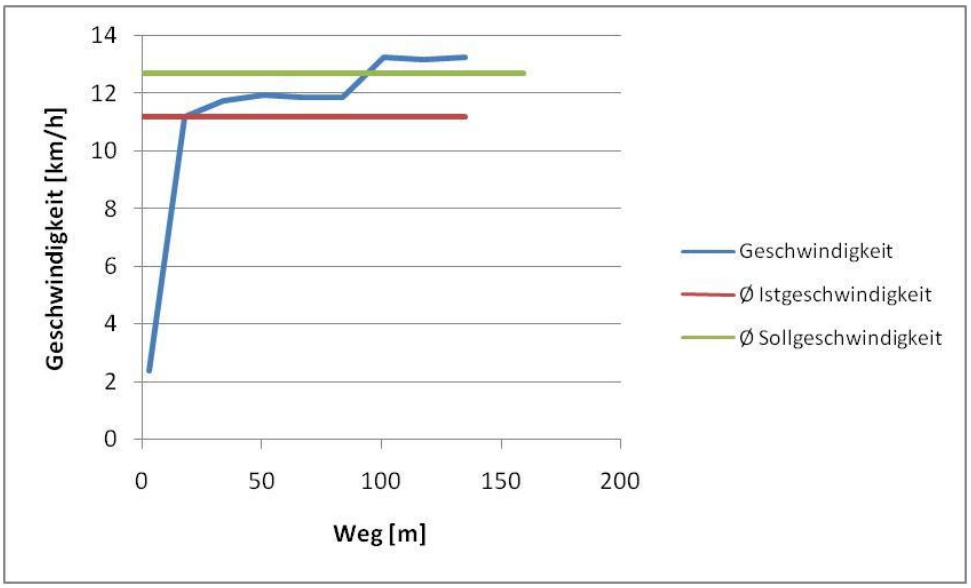


Abbildung 354: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf - anderer Anbringungsort

In Abbildung 354 ist ein typischer Geschwindigkeitsverlauf veranschaulicht. Zu beachten ist allerdings, dass die hier angezeigten Geschwindigkeiten von den Tatsächlichen abweichen:
Die fast senkrechte Anbringungsposition des Laufsensors bewirkt ein Kippen des Sensorinternen Bezugssystems, auf dem die beiden Beschleunigungsmesser in Horizontal- und Vertikalrichtung angeordnet sind. Durch die Neigung des Systems

werden demzufolge nicht mehr die Beschleunigungskräfte in Schrittrichtung und in vertikaler Richtung für die Schritthöhe ermittelt, sondern schräg in der Sagittalebene nach oben und unten. Auf Grundlage dieser Daten lässt sich über den geräteinternen Algorithmus nicht die tatsächlich gelaufene Geschwindigkeit bzw. Distanz rekonstruieren.

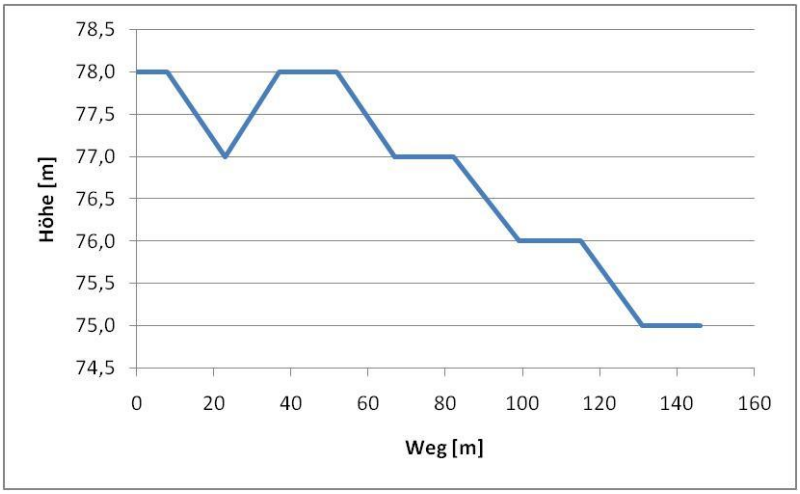


Abbildung 355: Teststrecke 10 - Höhenverlauf - anderer Anbringungsort

Da sowohl Barometer als auch Thermometer in der Armbanduhr S625X enthalten sind, hat die Position des Laufsensors keine Auswirkungen auf das Höhenprofil, wie es Abbildung 355 in gezeigt wird. Aus diesem Grund werden für die folgenden Test Höhenprofile nur bei auftretenden Besonderheiten dargestellt.

Plötzliches Anhalten

Neben dem Verhalten des Sensors während der Läufe ist auch seine Reaktion auf ein plötzliches Stehenbleiben von Interesse. Nach einem abrupten Anhalten bei einer Distanz von 110 m wurde dazu die Strecke notiert. 30 Sekunden später kam es zu einer erneuten Ablesung des Werts.

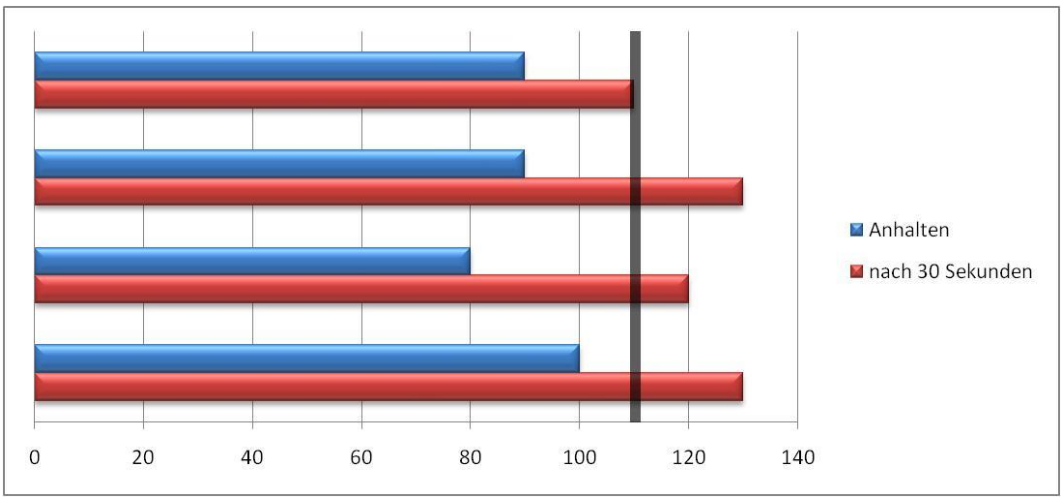


Abbildung 356: Teststrecke 10.0 - Plötzliches Anhalten (angezeigte Strecken)

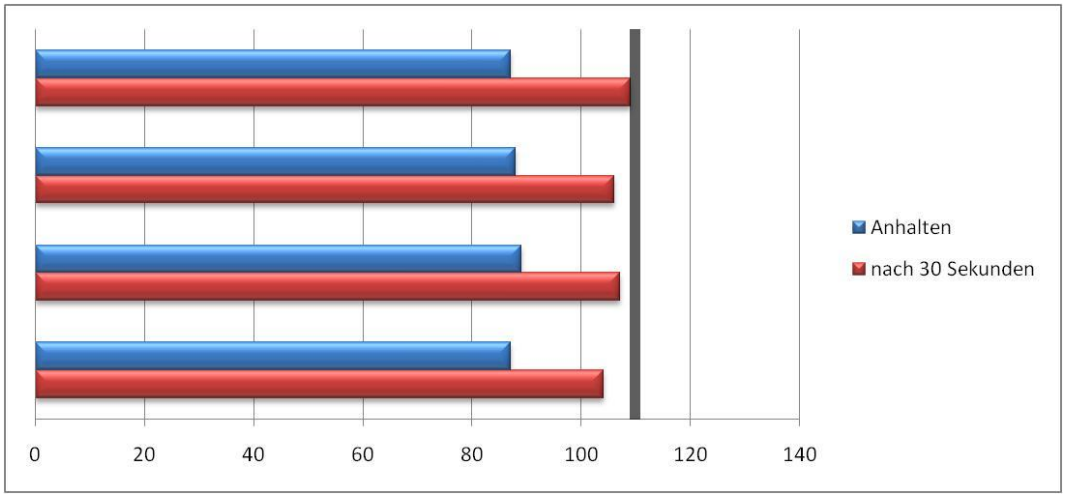


Abbildung 357: Teststrecke 10.0 - Plötzliches Anhalten (gespeicherte Strecken)

Anhand der ermittelten Daten lässt sich erkennen, dass sich die Strecken während der Pause von einer halben Minute trotz Stehenbleiben vergrößern. Sowohl bei den angezeigten (Abbildung 356) als auch bei den gespeicherten Strecken (Abbildung 357) sind die Werte zum Zeitpunkt des Anhaltens noch zu kurz, werden aber in der nachfolgenden Zeit noch korrigiert. Auf diese Weise ergibt sich aus den Dateien verhältnismäßig genau der Sollwert von 110 m, die angezeigten Strecken beschreiben meistens einen 10 – 15 m zu großen Distanzwert.

Bei Betrachtung des Geschwindigkeitsverlaufes in Abbildung 358 wird ersichtlich, weshalb es auch nach dem Anhalten zu einem Streckenzuwachs kommt. Das Stehenbleiben führt in jeder Messung zunächst zu einer etwas höheren Geschwindigkeit (im Diagramm steigt sie von 11,95 km/h auf 13,82 km/h an). Zum nächsten Speicherzeitpunkt maximal 5 Sekunden später wird weiterhin eine scheinbare, recht hohe Geschwindigkeit registriert und erst danach fällt sie gegen 0 km/h ab. Die Vergrößerung der Strecke nach dem Anhalten beruht somit auf der nachträglich ermittelten Geschwindigkeit.
Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass entweder die Auswertung der detektierten Beschleunigungen zeitverzögert erfolgt, oder eine Prädiktion, also eine Vorausberechnung auf Grundlage der bisher während einer Messung registrierten Bewegungsabläufe, durchgeführt wird. Da die Beschleunigungen in Laufrichtung für die Akzelerometer im S1 aus einer Summe von Gesamtbeschleunigungen in divergente Richtungen ermittelt werden müssen, ist die Messung mit Rauschanteilen überlagert. Für die Prädiktion dynamischer Systeme mit Rauschen wird meistens das Kalman-Filter verwendet, dessen Einsatz im Laufsensor bzw. in der S625X auf Grundlage von Abbildung 358 sehr wahrscheinlich ist.

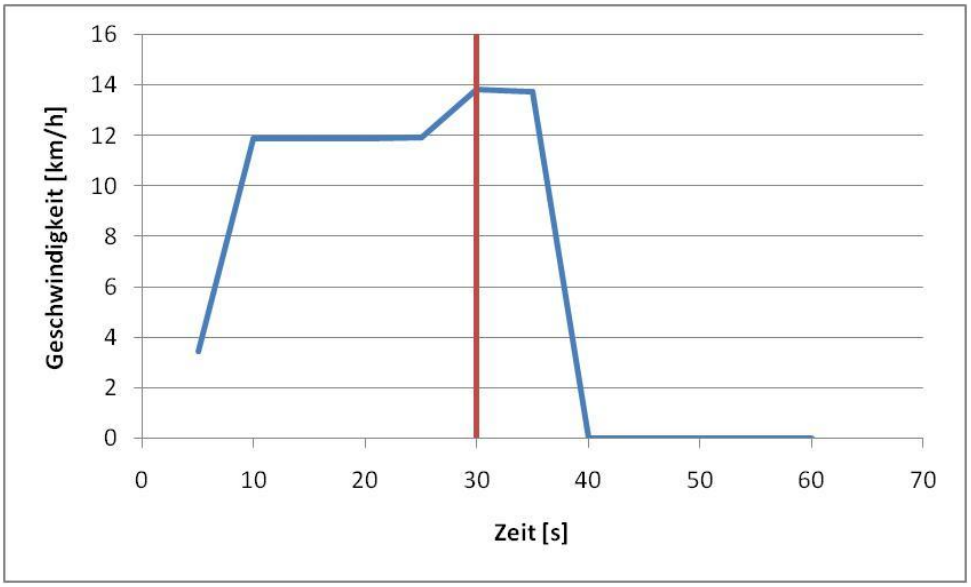


Abbildung 358: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf - Plötzliches Anhalten

Unterschiedliche Laufstile

Gehen

Im Folgenden werden die Einflüsse von verschiedenen Laufstilen auf die Genauigkeit des Gerätes überprüft. Der erste Test bezieht sich dabei auf normales Gehen anstelle von Laufen.

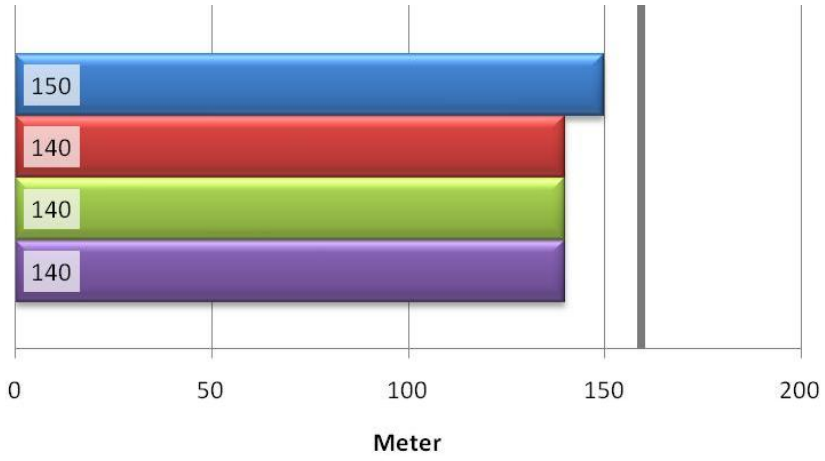


Abbildung 359: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken (Sollstrecke 159,4 m) - Gehen

Mit einem Mittelwert von 142,5 m (5 m Standardabweichung) und keiner Messung über 150 m sind die Strecken bei normalem Gehen ebenfalls verkürzt dargestellt (Abbildung 360). Die Streckengenauigkeiten betragen für die 150-Meter-Messung 94,1 % und für die restlichen Strecken 87,8 %. Wegen der Anzeigegenauigkeit fällt die Exaktheit der Messungen bei kurzen Strecken schnell ab.

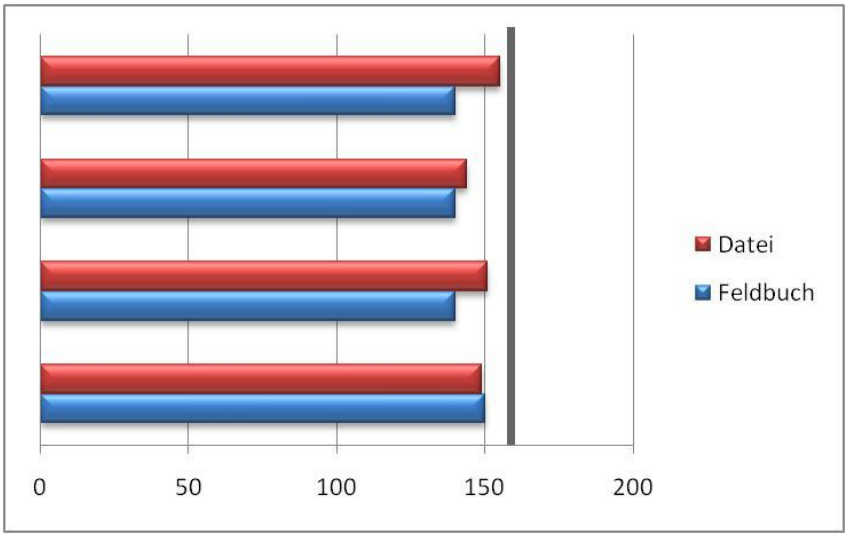


Abbildung 360: Teststrecke 10.0 – Vergleich angezeigte und aufgezeichnete Strecken - Gehen

Bis auf die untere Messung sind bei diesem Test die in der Datei aufgezeichneten Strecken (Mittelwert 149,75 m und Standardabweichung 4,6 m) wieder größer als die notierten, was, wie oben beschrieben, auf die Anzeigeverzögerung zurückzuführen ist.

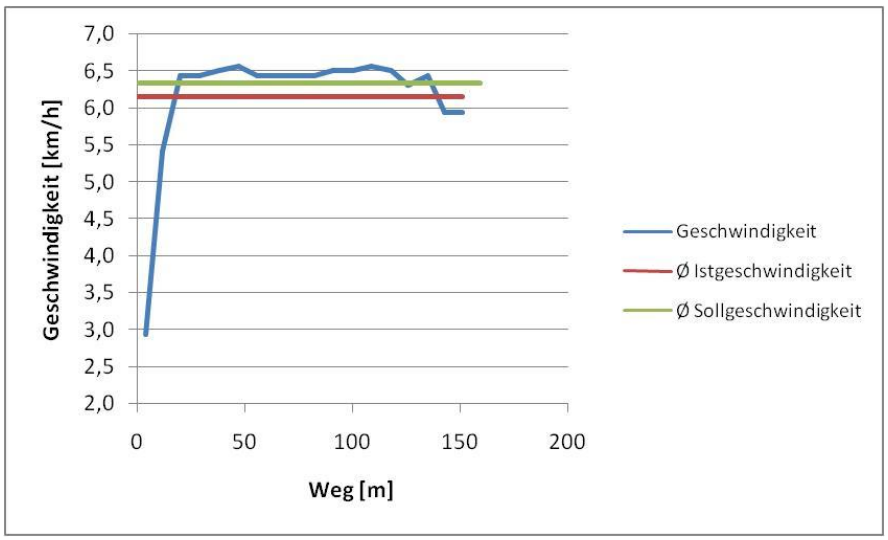


Abbildung 361: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf beim Gehen

Die Geschwindigkeit bleibt während des Gehens in Abbildung 361 nach dem Start recht einheitlich bei einem Niveau von ca. 6,3 km/h und es treten nur sehr kleine Schwankungen auf.

Beim Gehen wirken deutlich schwächere Beschleunigungskräfte auf den Fuß als beim Laufen. Die Empfindlichkeiten der beiden Akzelerometer im Sensor S1 müssen also sensitiv gegenüber kleinsten Kräften sein, um eine gegangene Strecke präzise zu modellieren. Da die gespeicherten Distanzen im Bereich zwischen 144 und 155 m liegen, werden wohl nur genügend Kräfte registriert, um die Strecken ungefähr, aber nicht exakt zu bestimmen.

Um sicherzustellen, dass die zu niedrigen Streckenwerte keine Folge der kurzen Teststrecke sind, wurde der „Gehen-Test“ auf der 500 m langen Referenzstrecke wiederholt. Die Ergebnisse in Abbildung 362 zeigen, dass der Eindruck über das Fehlverhalten bestätigt wird. Auch auf der langen Strecke werden deutlich zu kurze Distanzen angezeigt und aufgezeichnet (beide Mittelwert 435 m). Die tatsächliche Streckenlänge hat somit kaum Auswirkung auf die erzielbare Genauigkeit.

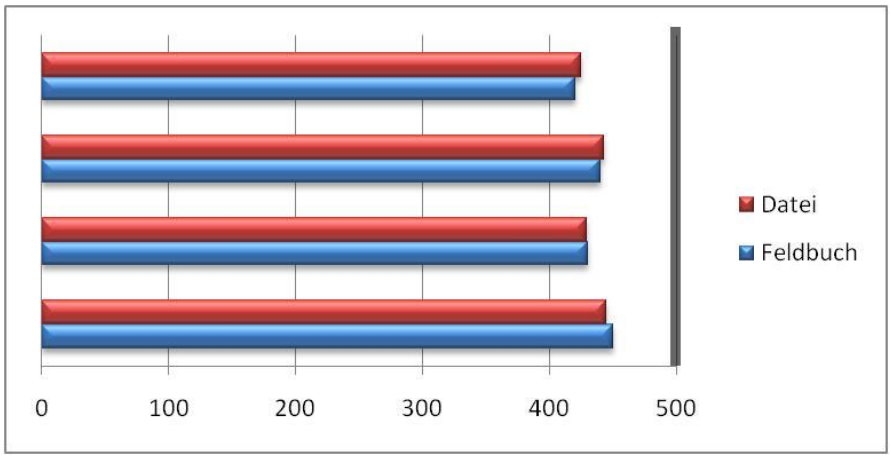


Abbildung 362: Teststrecke 1.0 - angezeigte und gespeicherte Werte beim Gehen

Große und kleine Schritte

Im nächsten Test werden die Ergebnisse von Läufen mit großen und kleinen Schritten miteinander verglichen. Die beiden Laufstile haben unterschiedliche Auswirkungen auf die wirkenden Kräfte am Fuß. Während bei großen Schritten starke Beschleunigungen innerhalb großer zeitlicher Intervalle auftreten, ist das Laufen mit kleinen Schritten von geringen Beschleunigungskräften, aber einer hohen Frequenz geprägt.

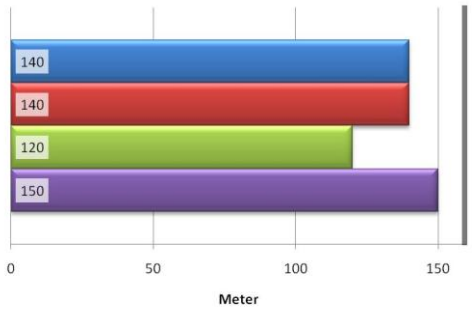


Abbildung 363: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken bei großen Schritten

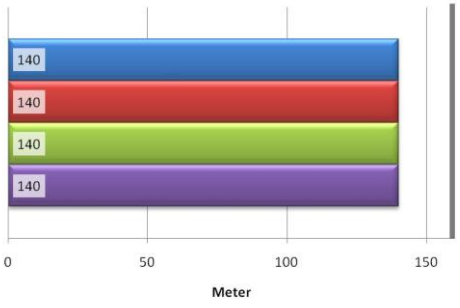


Abbildung 364: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken bei kleinen Schritten

Die Diagramme lassen erkennen, dass beide Laufstile zu ähnlichen angezeigten, wieder verkürzten Strecken führen. Die Mittelwerte der Ergebnisse liegen mit 137,5 m bei den großen und 140 m bei den kleinen Schritten dicht bei einander. Die Genauigkeiten betragen 86,3 % und 87,8 % der Sollstrecke und liegen somit außerhalb des angegeben Genauigkeitspotentials des Sensors, welches nur für konstante Bedingungen gültig ist.

Soll eine genaue Distanzmessung mit einem dieser Laufstile durchgeführt werden, so muss zunächst der Sensor bzw. die S625X mit dem Laufstil über größere Strecke kalibriert werden, da sie unkalibriert den großen Abweichungen zufolge nicht für diese Bewegungsmethode ausgelegt ist.

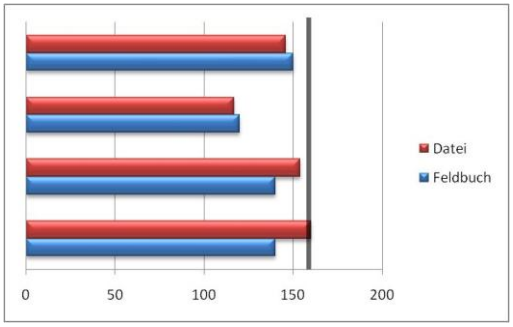


Abbildung 365: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken bei großen Schritten

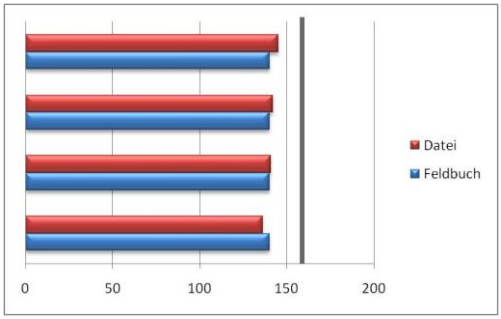


Abbildung 366: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken bei kleinen Schritten

Bei einem Vergleich von angezeigten und gespeicherten Strecken wird erneut deutlich, dass bei einigen Messungen der aufgezeichnete, bei den übrigen Läufen andererseits wieder der angezeigte Wert auf dem Display der S625X größer ist. Die abgespeicherten Distanzen passen sich beim Lauf mit großen Schritten besser der Sollstrecke an. Der Mittelwert beträgt 144,3 m, bei kleinen Schritten hingegen nur 141 m.

Ein anderer Aspekt ist die höhere Konstanz in den Messungen bei kleinen Schritten. Die Standardabweichung beträgt hier nur 3,7 m für die Werte aus der Datei und für die angezeigten Strecken 0 m, da immer 140 m ausgegeben wurden. Die vielen kleinen Schritte erzeugen einen relativ gleichmäßigen Laufstil, bei dem gleichförmige Beschleunigungen auf den Sensor wirken. Anders verhält es sich mit den großen Schritten. Die Standardabweichungen von 12,6 m (angezeigt) und 19 m aus der Datei belegen, dass unregelmäßige Kräfte auftreten. Bei großen Schritten wird der Fuß mit viel Schwung angehoben und nach vorne in Laufrichtung bewegt. Ist die gewünschte (große) Schrittweite erreicht, wird die Schwingphase abrupt beendet, indem er auf den Boden aufgesetzt und belastet wird. Durch das plötzliche Abbrechen der Schritte in der Luft und dem harten Aufsetzen sind die wirkenden Beschleunigungskräfte unterschiedlich. Dies lässt sich auch anhand der beiden Geschwindigkeitsverläufe in Abbildung 367 für große und in Abbildung 368 für kleine Schritte erkennen.

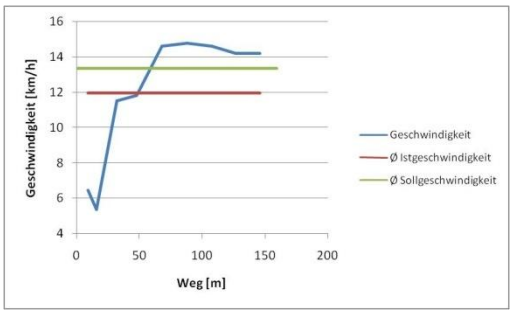


Abbildung 367: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf bei großen Schritten

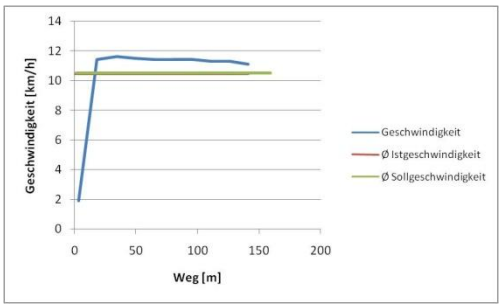


Abbildung 368: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf bei kleinen Schritten

Sprunglauf

Der Test „Sprunglauf“ wurde sowohl auf Teststrecke 10.0 mit einer Sollstrecke von 159,4 m, als auch auf Teststrecke 1 über eine Distanz von 500 m ausgeführt. Daraus sollen die Ergebnisse in Bezug auf das Genauigkeitsverhalten bei einem springenden Laufstil und zusätzlich die eventuelle Abhängigkeit von der zurückgelegten Strecke abgeleitet werden.

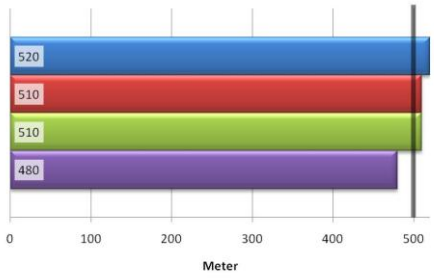


Abbildung 369: Teststrecke 1.0 - angezeigte Strecken beim Sprunglauf

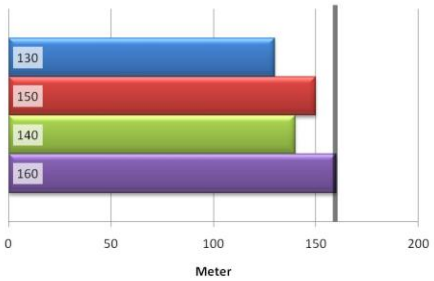


Abbildung 370: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken beim Sprunglauf

Die beiden Diagramme stellen die angezeigten Entfernungen beim Sprunglauf auf der 500 m langen Referenzstrecke (Abbildung 369) und auf Teststrecke 10.0 (Abbildung 370) mit einer Sollstrecke von 159,4 m dar. Auf den ersten Blick ist ersichtlich, dass sich die Werte auf Teststrecke 1.0 großteils oberhalb und die von Teststrecke 10.0 eher unter dem Sollwert befinden.

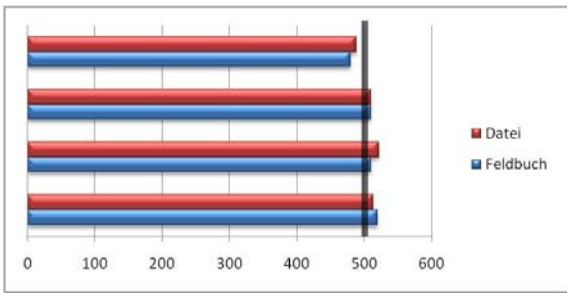


Abbildung 371: Teststrecke 1.0 - angezeigte und gespeicherte Strecken beim Sprunglauf

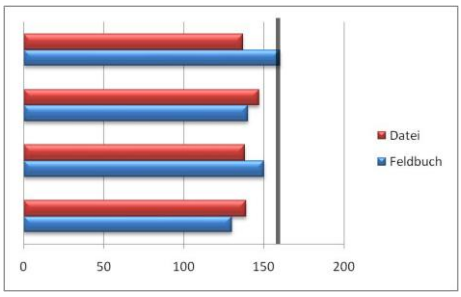


Abbildung 372: Teststrecke 10.0 - angezeigte und gespeicherte Strecken beim Sprunglauf

Das Bild setzt sich unter Einbezug der abgespeicherten Entfernungen fort und es treten bei beiden Strecken zum Teil die größeren, aber auch die kleineren Distanzen in den Dateien auf. Bei Teststrecke 1.0 belaufen sich die Mittelwerte auf 505 m (angezeigt, entspricht 1 % Abweichung) und 508,25 m (gespeichert, 1,7%), für Teststrecke 10.0 ergeben sich Durchschnittswerte von 145 m (angezeigt, 8,8%) und 140,25 m (gespeichert, 12 %).

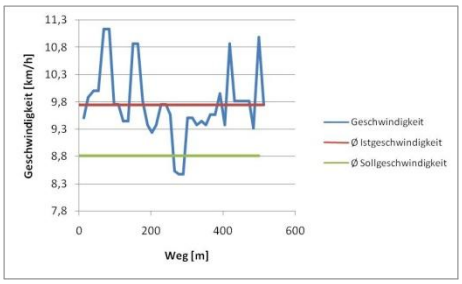


Abbildung 373: Teststrecke 1.0 - Geschwindigkeitsverlauf beim Sprunglauf

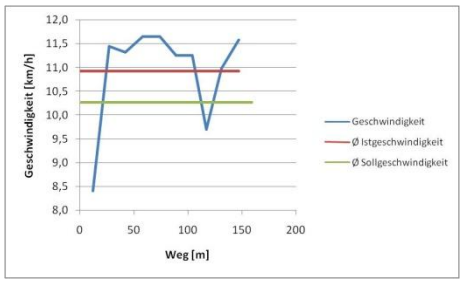


Abbildung 374: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf beim Sprunglauf

Bei den Geschwindigkeiten treten besonders während des Laufes auf Teststrecke 1.0 in Abbildung 373 größere Variationen auf. Da anhand der Geschwindigkeiten der zurückgelegte Weg mittels Integration errechnet wird, müssen die Geschwindigkeiten über die auftretenden Beschleunigungen präzise festgestellt werden. Werden diese korrekt erfasst, so verursachen Geschwindigkeitsvariationen keine schlechtere Streckengenauigkeit.
Die Genauigkeitsvergleiche zwischen den beiden Teststrecken führen zu der Annahme, dass auf längeren Strecken der zurückgelegte Weg exakter bestimmt werden kann.

Rückwärtslaufen

Im folgenden Test wird untersucht, ob der am Schuh befestigte Beschleunigungssensor die Strecke auch beim Rückwärtslaufen bestimmen kann.

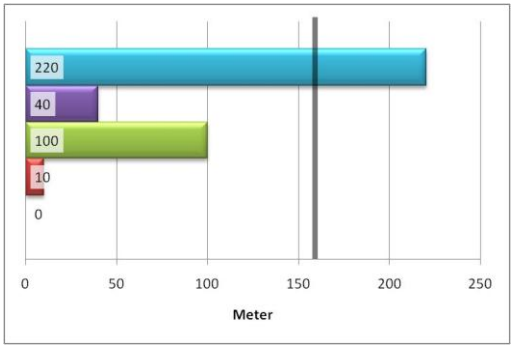


Abbildung 375: Teststrecke 10.0 - angezeigte Strecken beim Rückwärtslaufen

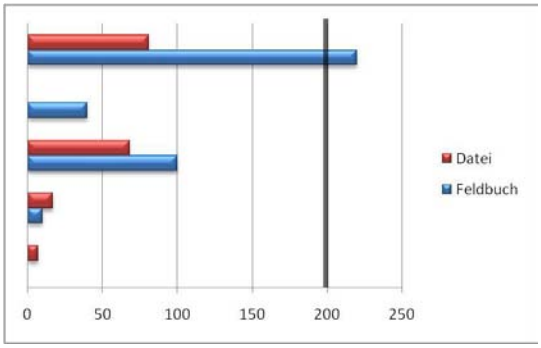


Abbildung 376: Teststrecke 10.0 - angezeigte und gespeicherte Strecken beim Rückwärtslaufen

Rückwärtslaufen führt mit dem S1 zu sehr heterogenen Ergebnissen, wie in den beiden Abbildungen verbildlicht wird. Zum Teil werden nach der 159 m langen Strecke Werte im Bereich zwischen 0 – 40 m angezeigt, wobei aber auch 100 m und 220 m ausgegeben werden. Der hohe Grad der Streuung wird in der sehr großen Standardabweichung von 90,44 m zum Mittelwert 74 m ausgedrückt. Der Durchschnittswert hat somit eine Genauigkeit von nur 46 % der Sollstrecke.
Des Weiteren ist bei diesen Messungen der Unterschied zwischen registrierten und angezeigten Entfernungen äußerst ausgeprägt. Der sich aus den Distanzen in den

Dateien ergebende Mittelwert beträgt mit 34,6 m nur die Hälfte des zuerst genannten. Als Beispiel wird bei der ersten Messung 220 m ausgegeben, während in der Datei hingegen nur 81 m aufgezeichnet sind. Zu diesem Ergebnis ist anzumerken, dass die Teststrecke für diese eine Messung nicht laufend, sondern rückwärts gehend zurückgelegt wurde. Das Gehen führt hierbei offensichtlich zu deutlich zu großen Anzeigewerten. In anderen Läufen treten zudem Situationen ein, bei denen entweder der gespeicherte oder der dargestellte Wert 0 m ergibt.

Das mathematische Modell zur Rekonstruktion der Schrittweite auf Grundlage der Beschleunigungen ist demzufolge nur für Vorwärtslaufen ausgelegt. Läuft man hingegen rückwärts, so wirken auf den Fuß bzw. Sensor abweichende Kräfte in die entgegengesetzte Richtung. Folglich lassen sich die einzelnen Schrittweiten nur mangelhalt ermitteln, woraus eine fehlerhafte Gesamtdistanz resultiert.

Anhand der Geschwindigkeitsaufzeichnungen lässt sich diese Aussage unterstreichen. In Abbildung 377 ist die Geschwindigkeit gegen den dritten Laufs (100 m Anzeige und 68 m gespeichert) gegen die Zeit abgetragen. Es wird ersichtlich, dass die Geschwindigkeiten nicht kontinuierlich erfasst werden, da es zu zwischenzeitlichen Aussetzern bei der Registrierung der Bewegungen kommt. Demzufolge fehlen bei der Berechnung der Gesamtstrecke größere Streckenabschnitte und die Distanzen werden nicht ihrer tatsächlichen Länge entsprechend erfasst.

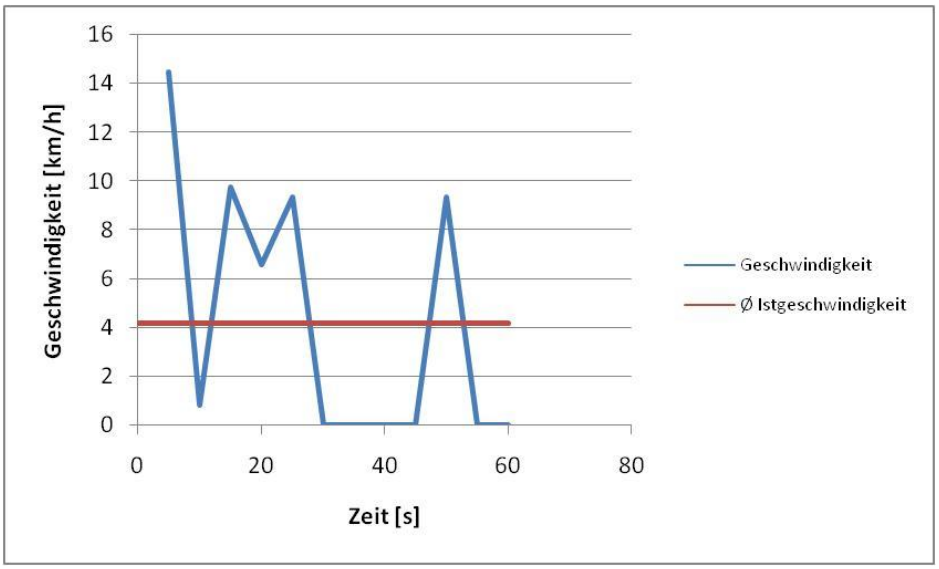


Abbildung 377: Teststrecke 10.0 - zeitlicher Geschwindigkeitsverlauf beim Rückwärtslaufen

Vorfußlauf und Walken

Vergleicht man in einem weiteren Test Vorfußlauf mit Walken, so treten ähnliche Ergebnisse auf, wie sie in den beiden folgenden Diagrammen dargestellt sind.

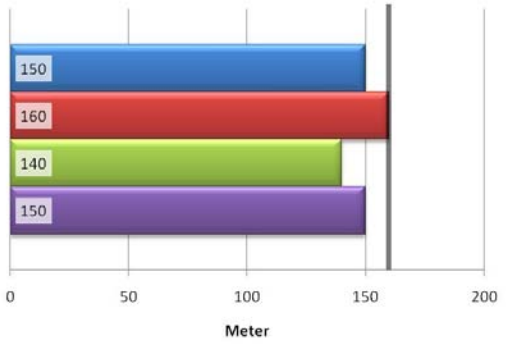


Abbildung 378: Teststrecke 10.0 - angezeigte Werte – Vorfußlauf

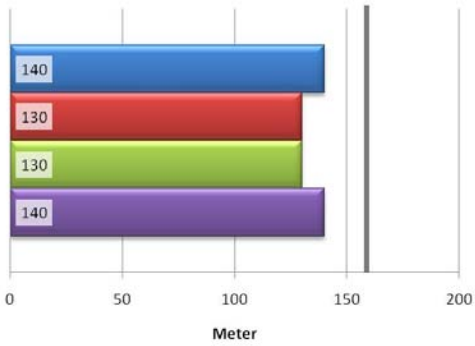


Abbildung 379: Teststrecke 10.0 - angezeigte Werte - Walken

Beide Laufstile führen erneut zu verkürzt angezeigten Strecken, wobei die Mittelwerte vom Test „Vorfußlauf“ mit 150 m und 156 m aus der Datei den Sollwert 159 m deutlich besser erreichen als die beim Walken erhaltenen Durchschnittswerte 135 m und 141 m (Datei). Folglich werden beim Walken mit 85 % bezogen auf die angezeigten Werte schlechtere Streckengenauigkeiten erreicht als 94 % ohne Abrollen.

Obwohl während des Walkens wie in Abbildung 381 zu sehen ist, eine sehr konstante Geschwindigkeit eingehalten und aufgezeichnet wurde, kann die Strecke wegen des schnellen Bewegungsablaufs und damit verbundenen, andersartig wirkenden Beschleunigungen bei diesem Laufstil nicht präzise wiedergegeben werden.

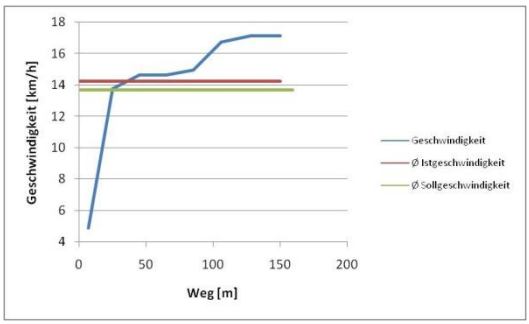


Abbildung 380: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf – Vorfußlauf

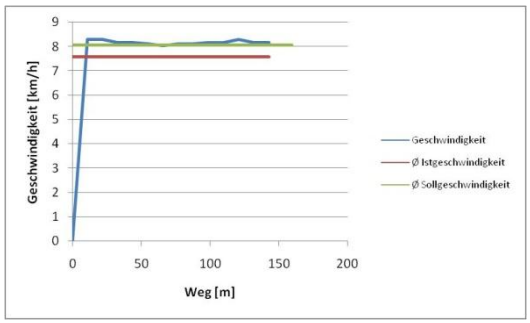


Abbildung 381: Teststrecke 10.0 - Geschwindigkeitsverlauf - Walken

4.6.5 Messprinzip Barometrische Höhenmessung

Zur Untersuchung der Genauigkeit des eingesetzten barometrischen Höhenmessers wurden Tests im Außenbereich (Teststrecke 4.0 und 4.1) sowie innerhalb eines Gebäudes durchgeführt. Betrachtet man die Höhenprofile aus den Tests zuvor, so fällt schnell auf, dass diese keine größeren Schwankungen aufweisen und die aufgezeichnete Höhe oft über längere Zeiträume stabil bleibt. Das Barometer der Polar S625X benötigt einen Referenzwert, um Differenzdrücke messen zu können. Für die Bestimmung absoluter Höhen muss also ein Bezugspunkt vorhanden sein, der eine bekannte Höhe besitzt und mit dessen Hilfe der Höhenmesser zunächst kalibriert wird. In Abbildung 382 wird der Startpunkt am Fuße des Hügels als Referenzhöhe genutzt und ausschließlich die notierten Höhenunterschiede betrachtet. Auffällig ist hierbei zunächst, dass sämtliche Distanzen fehlerhaft bestimmt wurden.

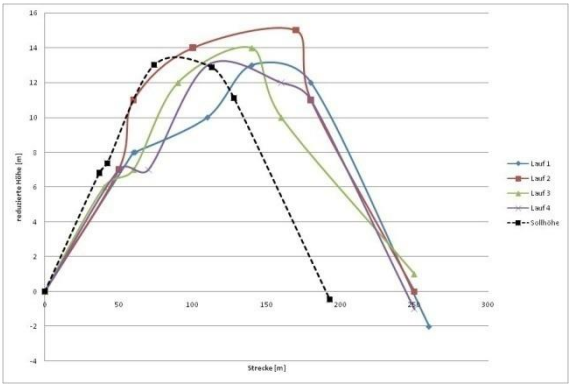


Abbildung 382: Teststrecke 4.0 – Relative Höhen

Während die angezeigten Strecken eher zu lang sind, zeichnet sich bei den aufgezeichneten Werten ein anderes Bild ab. Hier ist genau das Gegenteil der Fall, sämtliche Distanzen sind zu kurz bemessen. Ähnliches spielt sich nun auch bei den Höhen ab. Kommt es bei den angezeigten Höhen noch zu größeren Unsicherheiten bis zu 4 m, ergeben sich aus den aufgezeichneten Werten ausnahmslos Abweichungen zur Sollhöhendifferenz < 2 m, wie beispielhaft in Abbildung 383 dargestellt. Auch der Vergleich aller Läufe in Abbildung 384 bestätigt dies.

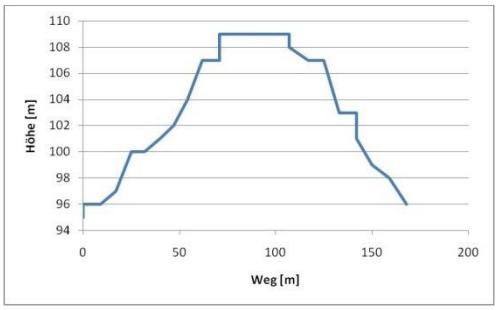


Abbildung 383: Teststrecke 4.0 – Einzelner Höhenverlauf

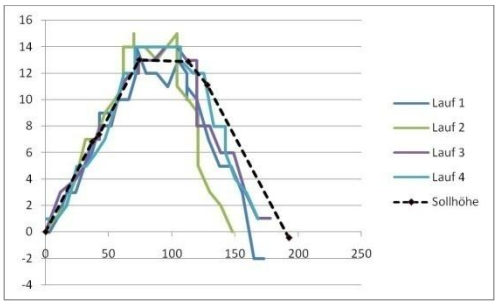


Abbildung 384: Teststrecke 4.0 – Vergleich aller Läufe mit relativer Sollhöhe

Teststrecke 4.1 bietet eine gleichmäßige Steigung bzw. ein gleichmäßiges Gefälle über eine längere Strecke von 259 m (siehe Teststrecken). Hier fanden weitere Genauigkeitsuntersuchungen statt. Dabei wurden zwei Höhen genau gemessen, wodurch ein Höhenunterschied von 12,41 m zustande kommt. An diesen zwei Stellen fanden daraufhin auch die Ablesungen statt. Reduziert auf die Anfangshöhe ergeben sich in Abbildung 385 Abweichungen zur Sollhöhe, auf der Krone des Gipfels, zu maximal 2,41 m (Lauf 3). Dabei ist auch anzumerken, dass das Auflösungsvermögen für Höhen bei der S625X nur 1 m beträgt, so dass es hier zweimal zur minimalen Abweichung von 41 cm kommt (Lauf 1 und 4).

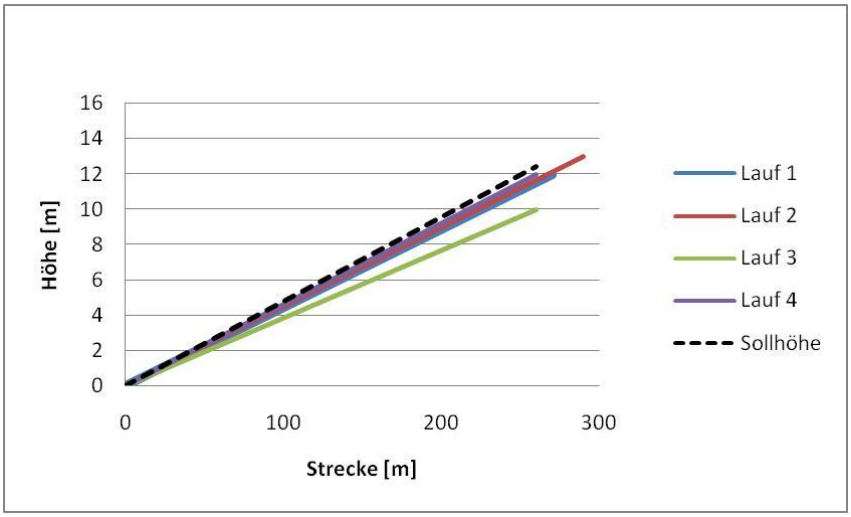


Abbildung 385: Teststrecke 4.1 – Relative Höhen

Bei Teststrecke 4.1 können, verglichen mit Strecke 4.0, keine Differenzen zwischen angezeigten und gespeicherten Höhen festgestellt werden. Abbildung 386 zeigt ein einzelnes Höhenprofil, was einen Gesamthöhenunterschied von 12 m beschreibt. Es treten jedoch teilweise etwas größere Schwankungen auf, so dass die Kurve keinen linearen Anstieg aufweist. Gleiches trifft auch auf alle anderen Läufe zu (siehe Abbildung 387).

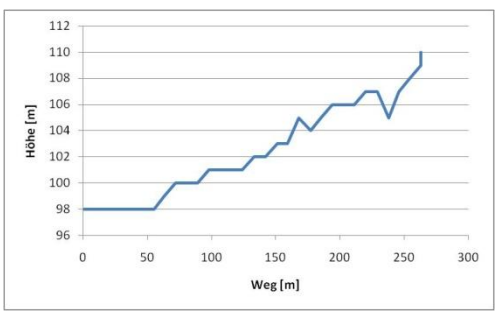


Abbildung 386: Teststrecke 4.1 – Einzelner Höhenverlauf

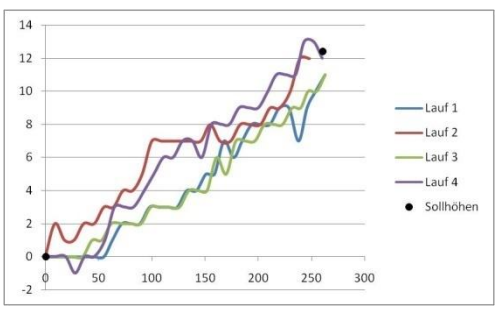


Abbildung 387: Teststrecke 4.1 – Vergleich aller Läufe mit relativer Sollhöhe

Um das Verhalten des Höhenmessers letztendlich noch unter möglichst geringem Einwirken von meteorologischen Einflüssen zu testen, wurde die Teststrecke MZ genutzt. Diese befindet sich in vertikaler Anordnung im Treppenhaus des „MZ-Gebäudes“ der Universität Hannover. Die Polar S625X wurde zunächst auf dem Anfangspunkt geeicht, um einen Vergleich mit den absoluten Sollhöhen zu ermöglichen. In Abbildung 388 werden die gemessenen Höhen dargestellt. Die Abweichungen liegen bei durchschnittlich 1,29 m und die Standardabweichung beträgt 1,16 m. Während zu Beginn der Messung noch keine Differenzen zum Sollwert auftreten, sind es nach einem Höhenunterschied von 70 m bereits 1 bis 3 m. Daraus resultiert eine Genauigkeit von > 97,5 %.

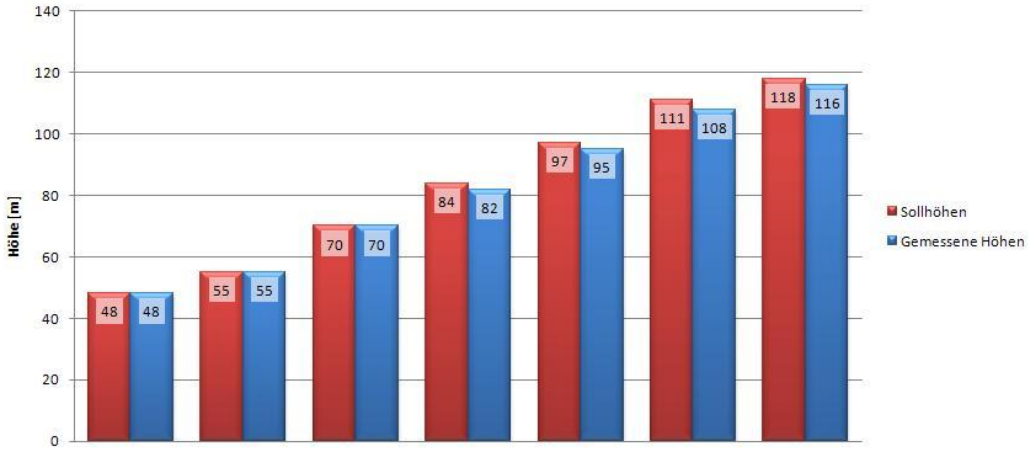


Abbildung 388: Teststrecke MZ – absolute Höhen

4.6.6 Zusammenfassung

Mit der Polar S625X liegt ein solides und gut ausgestattetes Laufset, bestehend aus der Armbanduhr, Pulsmesser und Beschleunigungssensor S1 vor. Nach dem Lesen der gut verständlichen Bedienungsanleitung ist die Uhr leicht zu bedienen, auch der Laufsensor ist schnell und unkompliziert am Schuh befestigt. Einzig das An- und Abnehmen des Brustgurtes für die Herzfrequenzmessung ist wegen des Verschlusses teilweise etwas schwerfällig.
Um ungewünschte Tastendrücke an der Uhr während des Laufens zu vermeiden, reagieren die Knöpfe erst spät auf eine Betätigung. Vorteilhaft ist die lange Aufzeichnungsdauer, die in Abhängigkeit vom eingestellten Speicherintervall zwischen nahezu 11 bis 100 Stunden umfasst. Die Daten können jedoch nur mit Infrarot von der Uhr an den PC übertragen werden, weshalb der Computer für eine Auswertung der Daten die entsprechende Schnittstelle besitzen muss.

In Bezug auf die Genauigkeit ist das Verhalten des Sportcomputers zweigeteilt. Der Hersteller gibt eine Abweichung von ±3 % von den tatsächlichen Streckenlängen unter konstanten Bedingungen an. In der Tat werden bei „normalen“ Läufen auf den ersten Teststrecken Genauigkeiten zwischen 97 – 99 % erreicht. Die Genauigkeitsanforderungen werden somit eingehalten. Allerdings beziehen sich die genannten 3 % auf unkalibrierte Sensoren. Zur Präzisionssteigerung wird ein Kalibrierungslauf über mindestens 1200 m empfohlen. Da sich für die Tests ein Faktor von genau 1000 ergab, hatte er keinen Einfluss auf die später angezeigten Distanzen. Die Qualität der Messungen ließ sich in diesem Fall folglich nicht weiter durch eine Kalibrierung verbessern.
Neben den Tests auf geraden und kurvigen Strecken wurde der Beschleunigungssensor auch auf einen abweichenden Anbringungsort und diverse verschiedene Laufstile hin untersucht. Dabei ist auffällig, dass die Strecken meistens deutlich zu kurz ermittelt wurden. Bei Tests wie beispielsweise dem Rückwärtslaufen ergibt sich eine durchschnittliche Genauigkeit von nur 46 %, wobei die Messergebnisse hier weit gestreut sind.
Der barometrische Höhenmesser sorgt für gleichmäßige Höhenprofile und weist bei Höhenunterschieden von bis zu 30 m kaum Unsicherheiten auf.

Weiterhin ist als Kritikpunkt anzuführen, dass die angezeigten Werte auf dem Display der S625X zum Teil stark von den aufgezeichneten Werten abweichen.
Zusammengefasst ist die Genauigkeit des Laufsets von Polar für normale Läufe den Vorstellungen entsprechend im Rahmen der Genauigkeitsangabe des Herstellers von ± 3 %. Bessere Ergebnisse wurden nur vereinzelt erreicht. Für besondere Laufstile wie etwa Walken oder einfaches Gehen ist der Laufsensor hingegen nicht ausgelegt.

4.7 Gerätevergleich

4.7.1 Vergleich

Für den Vergleich der Geräte und Messverfahren untereinander werden die durchschnittlich erzielten Streckengenauigkeiten herangezogen. Durch die Unterteilung in die einzelnen Teststrecken lassen sich so auch Empfehlungen zu den jeweiligen Einsatzgebieten treffen. Die Genauigkeiten werden für die Bewertung in folgende Intervalle eingeteilt und später farblich abgestuft:

> 99,5 %	sehr gut
> 98,5 %	gut
> 97,0 %	befriedigend
> 95,0 %	ausreichend
< 95,0 %	mangelhaft

Teststrecke 1.0 (optimale Bedingungen)

Teststrecke 1.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Garmin Edge 305**	**99,8**
2	Garmin Foreunner 305	98,8
3	FRWD W600	98,4
4	Polar S625X	97,7
5	Casio GPR 100	96,7
6	Ciclosport HAC 5 + RDS II	95,3

Bei den Tests unter optimalen Bedingungen konnten die Geräte mit GPS-Funktion im Durchschnitt die höchsten Genauigkeiten erzielen. Am besten schneiden hier die Geräte von Garmin ab, die sich mit einem Wert von > 98,5 % gut bis sogar sehr gut für die Entfernungsmessung unter freiem Himmel eignen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Geräten lässt sich durch den Anbringungsort erklären. Während der Edge 305 stabil am Fahrradlenker montiert ist oder, wie während der Tests, beim Laufen relativ ruhig vor den Körper gehalten wird, ist der Forerunner durch die Anbringung am Arm ständig in Bewegung. Um diese Vorwärts- und Rückwärtsbewegung auszugleichen, werden die Messwerte gefiltert. Außerdem kommt es beim Forerunner zu größeren Abschattungen durch den Nutzer selbst. Polar S625X und FRWD W600 können befriedigende Ergebnisse vorweisen. Letzterer fällt durch vereinzelte Messungen auf, die signifikant von allen anderen abweichen. Die S625X liefert hingegen Strecken, die

trotz vorangegangener Kalibrierung, zu kurz gemessen werden. Bei der Casio GPR 100 wird keine Glättung bzw. Filterung verwendet, wodurch sich Querabweichungen im vollen Umfang auf die Strecken auswirken. Vor allem die letztendlich aufgezeichneten Entfernungen sorgen bei der Radarmessung der Ciclosport HAC 5 für die größten Abweichungen zur Sollstrecke. Die Werte in Echtzeit sind zwar etwas genauer, können aber trotzdem höchstens als ausreichend bezeichnet werden.

Teststrecke 2.0 (eingeschränkte Sicht durch Gebäude)

Teststrecke 2.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Garmin Edge 305**	**99,7**
2	Garmin Foreunner 305	97,5
3	FRWD W600	96,2
4	Casio GPR 100	93,9

Verschlechterte Empfangsbedingungen durch Gebäude rufen beim Edge 305 fast gar keine Unsicherheiten hervor. Der Forerunner 305 hat hingegen durch die zusätzlichen Abschattungen durch den Nutzer bereits größere Schwierigkeiten bei der Ermittlung der korrekten Entfernung. Beim FRWD treten nicht unerhebliche Querabweichungen auf, die sich vor allem in den angezeigten Werten wiederspiegeln. Nach dem Auslesen des Geräts weist dieser dann jedoch durch Filterung höhere Genauigkeiten auf, die dann wiederum als gut bezeichnet werden können. Zu mangelhaften Ergebnissen kommt es allerdings bei der Casio GPR 100, wobei es hier zu ähnlichen zusätzlichen Abschattungen durch den Nutzer kommt.

Teststrecke 2.1 (eingeschränkte Sicht durch Bäume)

Teststrecke 2.1		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Garmin Edge 305**	**99,9**
2	Garmin Foreunner 305	99,5
3	Polar S625X	98,9
4	FRWD W600	97,9
5	Casio GPR 100	89,9

Bei den durch Bäume verursachten Abschattungen können erneut die beiden Garmin Geräte überzeugen. Dank der hohen Empfindlichkeit der verbauten SiRFstarIII-Chipsätze werden GPS-Signale durch die Baumkronen hindurch trotzdem noch empfangen, wodurch es hier zu sehr guten Ergebnissen kommt. Diese beiden Geräte eignen sich also auch gut für Nutzer, die besonders häufig in Parks, Alleen oder helleren Waldstücken trainieren. Ähnliches gilt für die Polar S625X, wobei diese nicht auf den Empfang von Signalen angewiesen ist. Der verwendete Beschleunigungssensor kann gerade auf

Untergründen wie Schotter (mittlere Festigkeit) hohe Genauigkeiten erreichen. Nicht alle Messungen des FRWD W600 sind nur befriedigend, einige Ergebnisse sind sogar als gut zu bezeichnen. Betrachtet man die aufgezeichneten Distanzen, können hier 100 % Genauigkeit erreicht werden, was aufgrund des großen Spektrums an völlig unterschiedlich bestimmten Tracks etwas verwunderlich erscheint. Die Casio GPR zeigt erneut als einziges Gerät große Probleme mit der Ermittlung der zurückgelegten Entfernung.

Teststrecke 3.0 (stark eingeschränkte Sicht)

Teststrecke 3.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Garmin Forerunner 305**	**97,8**
2	Casio GPR 100	96,5
3	Garmin Edge 305	95,2
4	FRWD W600	91,6

Im Wald, und damit unter schlechtesten Bedingungen für GPS-Messungen, schneiden alle getesteten Geräte nicht besonders gut ab. Hier ist der Garmin Forerunner 305 der Testsieger. Während die angezeigten Werte als mangelhaft bezeichnet werden müssen, können bei der anschließenden Auswertung sehr gute Ergebnisse erbracht werden. Das Zusammenspiel aus geradlinigem Streckenverlauf und einzelnen gemessenen Koordinaten verhilft der Casio GPR 100 bei stark eingeschränkter Sicht zu einer ausreichenden Leistung. Mangelhaft sind hier die erzielten Genauigkeiten des FRWD W600. Die Ursache hierfür sind vor allem komplette Signalausfälle, wobei der eingesetzte Empfänger die Signale nicht lang genug halten kann.

Teststrecke 4.0 (großer Höhenunterscheid – Anstieg und Abstieg)

Teststrecke 4.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**FRWD W600**	**99,6**
2	Garmin Forerunner 305	98,6
3	Garmin Edge 305	95,9
4	Ciclosport HAC 5 + RDS II	93,5
5	Polar S625X	80,3

Bei der Überwindung von großen Höhenunterschieden zeigt sich, dass der FRWD W600 nicht nur das größte Auflösungsvermögen von allen Geräten besitzt, sondern auch die genauste Höhenmessung aufweisen kann. Während die absoluten Höhen des W600 oftmals als mangelhaft bezeichnet werden müssen, ergeben sich durch den eingesetzten barometrischen Höhenmesser die präzisesten relativen Höhen. Dies lässt sich hier auch bei den Strecken erkennen, da diese direkt aus den 3D-Koordinaten berechnet werden. Gute Ergebnisse werden hier auch vom Garmin Forerunner 305 erzielt. Dieser ermittelt

die Höhe per GPS-Messung. Gleiches gilt für den Edge 305, der jedoch zusätzlich über ein eingebautes Barometer verfügt. Dieser kann allerdings nur ausreichende Ergebnisse erzielen. Völlig unabhängig von den Höhen ermittelt die Ciclosport HAC 5 mit eingesetztem Radarmessverfahren die zurückgelegte Strecke. Der verbaute barometrische Höhenmesser weist hohe Genauigkeiten auf, was bei den gemessenen Distanzen jedoch nicht der Fall ist. Die Ergebnisse der Polar S625X sind hier fast als unbrauchbar zu bezeichnen, was mit den veränderten Beschleunigungskräften, die bei An- und Abstieg wirken, zusammenhängt.

Teststrecke 4.1 (großer Höhenunterschied – gleichmäßiger Anstieg)

Teststrecke 4.1		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Garmin Forerunner 305**	**99,9**
2	FRWD W600	98,5
2	Garmin Edge 305	98,5
2	Ciclosport HAC 5 + RDS II	98,5
5	Polar S625X	97,9

Bei einem gleichmäßigen Anstieg zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei einem Anstieg mit anschließendem Abstieg: Der Garmin Forerunner 305 schneidet hier am besten ab. Aber auch die Ergebnisse von FRWD W600, Garmin Edge 305 und auch von Ciclosport HAC 5 mit RDS II weisen gute Genauigkeiten auf. Selbst die Polar S625X liefert befriedigende Ergebnisse. Auffällig ist, dass grundsätzlich alle Geräte mit einem einseitigen Anstieg, ohne schnell darauffolgenden Abstieg, besser zurechtkommen.

Teststrecke 5.0 (bewegte Umgebung)

Teststrecke 5.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	Ciclosport HAC 5 + RDS II	90,9

Nur bei radarbasierten Messverfahren spielt die Umgebung, in der sich der jeweilige Nutzer bewegt, eine Rolle, da hier die unmittelbare Umgebung abgetastet wird. Die Ciclosport HAC 5 zeigt unter Einsatz des RDS II große Schwächen auf diesem Gebiet. Gerade dann, wenn dem Nutzer Personen, Autos oder ähnliches in nächster Nähe entgegenkommen, werden nur mangelhafte Genauigkeiten erzielt.

Teststrecke 6.0 (weicher Untergrund)

Teststrecke 6.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Polar S625X**	**97,7**
2	Ciclopsort HAC 5 + RDS II	96,3

Bei weichen Untergründen, wie hier zum Beispiel Rasen, haben sowohl der Beschleunigungssensor als auch der Radarmesser RDS II des Ciclosport HAC 5 kleinere Probleme bei der Bestimmung des zurückgelegten Wegs, erzielen aber trotzdem befriedigende bzw. ausreichende Ergebnisse, wobei die Polar S625X den Testsieger in dieser Kategorie darstellt.

Teststrecke 7.0 (mittlerer Untergrund)

Teststrecke 7.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Polar S625X**	**99,7**
2	Ciclosport HAC 5 + RDS II	94,6

Bei Untergründen mit einer mittleren Festigkeit wie Schotter kann die Polar S625X besonders punkten. Die sehr guten Ergebnisse die hier erzielt werden, fallen bereits bei Teststrecke 2.1 auf. Dies hat den Vorteil, dass vor allem im Freizeitbereich die größte Anzahl an Laufstrecken einen derartigen Untergrund aufweist. Die erzielten Genauigkeiten der Ciclosport HAC 5 mit RDS II sind hier nur als mangelhaft einzustufen.

Teststrecke 8.0 (kurviger Streckenverlauf)

Teststrecke 8.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Garmin Forerunner 305**	**99,0**
2	Polar S625X	98,5
3	Garmin Edge 305	97,2
4	Ciclosport HAC 5 + RDS II	96,2
5	FRWD W600	95,3
6	Casio GPR 100	88,2

Kurvenreiche Strecken erzeugen keine Schwierigkeiten bei Garmin Forerunner 305 und Polar S625X. Beim Garmin Edge 305 sind vor allen Dingen die mangelhaften Ergebnisse, die aus den aufgezeichneten Werten resultieren, für eine Gesamtgenauigkeit verantwortlich, die nur noch als befriedigend bezeichnet werden kann. Gleiches gilt für den FRWD W600, deren angezeigte Entfernungen sogar sehr gut sind. Bei der als ausreichend einzustufenden Ciclosport HAC 5 ist dies hingegen nicht der Fall. Die Casio GPR 100 ist hier das einzige Gerät, das mangelhafte Ergebnisse vorzeigt.

Teststrecke 9.0 (Signalunterbrechung)

Teststrecke 9.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Garmin Forerunner 305**	**99,1**
2	Garmin Edge 305	98,3
3	Casio GPR 100	97,5
4	FRWD W600	96,6

Bei einer vorrübergehenden Signalunterbrechung kann der Garmin Forerunner 305 die besten Ergebnisse erzielen. Im Vergleich zum Garmin Edge 305 sorgt der eingesetzte Glättungsfilter hier stärker für eine Kompensation der Querabweichungen. Trotzdem sind die erreichten Genauigkeiten als befriedigend zu bezeichnen. Das gleiche gilt hierbei für die Casio GPR 100. Durch die Unterbrechung der Messung bei fehlenden GPS-Signalen können sich mögliche Querabweichungen gar nicht erst auf die Genauigkeit auswirken. Durch Glättung werden besagte Abweichungen beim FRWD W600 noch etwas eingedämmt, sorgen aber trotzdem dafür, dass die erzielten Ergebnisse nur ausreichend sind.

Teststrecke 9.1 (Signalunterbrechung)

Teststrecke 9.1		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Garmin Forerunner 305**	**99,8**
2	Garmin Edge 305	99,1
3	Casio GPR 100	98,4
4	FRWD W600	97,8

Bei einer Signalunterbrechung über einen etwas längeren Zeitraum zeigt sich die identische Reihenfolge. Allerdings können von allen getesteten Geräten höhere Genauigkeiten erzielt werden, was durch die optimalen Bedingungen für GPS-Messungen vor und direkt nach der Signalunterbrechung zu erklären ist. Insgesamt lässt sich aber sagen, dass kurzzeitige Ausfälle des Signals bei geradlinigen Strecken nur wenig Einfluss auf die Genauigkeit von Geräten mit GPS-basiertem Messverfahren besitzen.

Teststrecke 10.0 (anderer Anbringungsort)

Teststrecke 10.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	Polar S625X	83,3

Setzt man den Beschleunigungssensor der Polar S625X etwas höher am Fuß an, so verschlechtert sich auch sofort die Genauigkeit der Streckenmessung. Abhängig von der Kalibrierung ist es also wichtig, das Gerät immer an der gleichen Stelle zu belassen.

Teststrecke 10.0 (Ausrichtung des Geräts nach hinten)

Teststrecke 10.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	Ciclosport HAC 5 + RDS II	65,5

Teststrecke 10.0 (Ausrichtung des Geräts zur Seite)

Teststrecke 10.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	Ciclosport HAC 5 + RDS II	21,8

Auch bei der Ciclosport HAC 5 mit eingesetztem RDS II spielt gerade der Anbringungsort des Radarsensors eine große Rolle. Sobald dieser nicht mehr direkt nach vorne ausgerichtet ist, kommt es zu Unsicherheiten. Wird das Gerät in Laufrichtung nach

hinten ausgerichtet, sind die erzielten Genauigkeiten mangelhaft, während Messungen mit seitlich angebrachtem RDS II komplett unbrauchbar sind.

Teststrecke 10.0 (Laufstil: Gehen)

Teststrecke 10.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Polar S625X**	**91,9**
2	Ciclopsort HAC 5 + RDS II	91,7

Werden der Beschleunigungssensor der Polar S625X oder der Radarsensor der Ciclosport HAC 5 unter verlangsamten Geschwindigkeiten, zum Beispiel beim Gehen, verwendet, kommt es in beiden Fällen zu ähnlichen mangelhaften Ergebnissen.

Teststrecke 10.0 (Laufstil: Walking)

Teststrecke 10.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Ciclosport HAC 5 + RDS II**	**96,7**
2	Polar S625X	86,8

Auch beim Walking kann keine der beiden Sportuhren wirklich überzeugen, wobei die erzielten Genauigkeiten der Ciclosport HAC 5 mit RDS noch als ausreichend zu bezeichnen sind. Vom Einsatz der Polar S625X beim Walking ist jedoch eher abzuraten.

Teststrecke 10.0 (Lauftechnik: Große Schrittweite)

Teststrecke 10.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Polar S625X**	**88,6**
2	Ciclopsort HAC 5 + RDS II	33,0

Teststrecke 10.0 (Lauftechnik: Kleine Schrittweite)

Teststrecke 10.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Ciclosport HAC 5 + RDS II**	**96,2**
2	Polar S625X	88,4

Bei der Wahl der unterschiedlichen Schrittweiten fällt auf, dass die Genauigkeit der Polar S625X sowohl bei großen als auch bei kleinen Schrittweiten mangelhaft ist. Während besonders kleine Schrittweiten bei der Ciclosport HAC 5 noch zu ausreichenden Ergebnissen führen, müssen Strecken, die bei Läufen mit großen Schrittweiten gemessen werden, als absolut unbrauchbar bezeichnet werden.

Teststrecke 10.0 (Lauftechnik: Vorfußlauf)

Teststrecke 10.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	Polar S625X	96,2

Teststrecke 10.0 (Lauftechnik: Springen)

Teststrecke 10.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Polar S625X**	**89,7**
2	Ciclopsort HAC 5 + RDS II	86,4

Teststrecke 10.0 (Laufrichtung rückwärts)

Teststrecke 10.0		
Platz	**Gerät**	**Genauigkeit [%]**
1	**Ciclosport HAC 5 + RDS II**	**89,7**
2	Polar S625X	34,2

Auch bei anderen Lauftechniken bzw. –Stilen ergeben sich nur mangelhafte bis maximal ausreichende Ergebnisse. Das Rückwärtslaufen ist laut der durchgeführten Tests mit der Polar S625X so gut wie gar nicht mit einer brauchbaren Streckenmessung zu verbinden, dies ist mit der Ciclosport HAC 5 + RDS II bedingt möglich. Allerdings sind auch hier die erzielten Genauigkeiten als mangelhaft zu bezeichnen.

4.7.2 Empfehlungen

Der Garmin Forerunner 305 ist Läufern in allen Regionen zu empfehlen. Sie stellt die ausgeglichenste Sportuhr dar, besitzt jedoch leichte Schwächen in Häuserschluchten oder zwischen anderen größeren Bauwerken.

Der Garmin Edge 305 ist vor allem Fahrradfahrern im Flachland zu empfehlen. Die einzigen Schwächen des Geräts liegen bei größeren Höhenunterschieden auf kurze Distanzen oder auch in dichteren Waldstücken vor. Diese, für GPS-Messungen bekannte Schwäche, kann jedoch durch Einsatz des Geschwindigkeitsmessers vernachlässigt werden.

Der FRWD W600 ist besonders Läufern oder auch Skifahrern im Bergland unter freiem Himmel zu empfehlen. Der eingebaute barometrische Höhenmesser liefert sehr hohe Genauigkeiten, wobei die absoluten Höhen meist fehlerhaft sind. Schwächen besitzt der GPS-Empfänger vor allen Dingen bei Abschattungen jeglicher Art.

Die Casio GPR 100 ist vor allem den Personen zu empfehlen, die eine alltagstaugliche Sportuhr mit Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung suchen, welche jedoch nur unter freiem Himmel zum Einsatz kommen kann. Die Schwächen liegen hier vor allen Dingen bei kurvenreichen Strecken vor.

Die Polar S625X mit zugehörigem Beschleunigungssensor ist Läufern im Flachland zu empfehlen, die regelmäßig gleiche Strecken bei gleichem Laufstil zurücklegen oder die innerhalb von Gebäuden trainieren. Schwächen treten hier vor allem bei größeren Höhenunterschieden auf.

Die Ciclosport HAC 5 mit eingesetztem Radarsensor ist Läufern zu empfehlen, die innerhalb von Gebäuden oder auf freien Strecken trainieren. Die Schwächen liegen dabei hauptsächlich bei leicht vom vorbestimmten Anbringungsort abweichenden Ausrichtungen des Geräts, aber auch bei Läufen unter Einsatz größerer Schrittweiten.

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Der Einsatz von Sportuhren bei Freizeitanwendungen sowie im Leistungssport nimmt stetig zu. Neuerdings werden dazu nicht nur Uhren mit Herzfrequenzmessern, sondern vor allem Geräte mit Geschwindigkeits-, Entfernungs- und Höhenmessfunktion verwendet. Um dabei verlässliche Trainingsdaten zu erhalten, sollten bei den Messungen auch dementsprechende Genauigkeiten erreicht werden. Aus diesem Grund ist eine Genauigkeitsuntersuchung der verschiedenen Geräte und Messverfahren durchzuführen.

Zunächst musste dabei geklärt werden, welche Fehlereinflüsse bei den jeweiligen Geräten bzw. Messverfahren zu beachten waren, um eine Referenz zu schaffen, bei der Idealbedingungen herrschten. Im Anschluss daran sollte der Einfluss einzelner Störquellen auf die Genauigkeit untersucht werden. Dabei war darauf zu achten, dass immer nur eine dieser Störquellen isoliert auftrat. Hierfür wurden verschiedene Teststrecken und andere Szenarien erkundet und exakt vermessen. Während bei Geräten mit GPS-basiertem Messverfahren verschiedene Sichtweiten von Bedeutung waren, sollten Beschleunigungs- und Radarsensoren auf unterschiedlichen Untergründen getestet werden. Letztere wurden unter Verwendung verschiedener Laufstile und –Techniken eingesetzt, da die Bewegung des Nutzers selbst, im Gegensatz zu Satellitenmessungen, eine große Rolle spielt. Um „Ausreißern“ vorzubeugen und zur Schaffung einer höheren Redundanz bei der Genauigkeitsbetrachtung, wurden sämtliche Tests mehrmals durchgeführt.

Aus den daraus gewonnen Erkenntnissen lässt sich nun zusammengefasst sagen, dass sich grundsätzlich alle eingesetzten Messverfahren für Geschwindigkeits- oder Distanzmessungen eignen. Die jeweiligen Genauigkeiten unterscheiden sich jedoch teilweise recht stark. Geräte, die GPS-Messungen durchführen, liefern dabei prinzipiell die exaktesten Werte, wobei auch der eingesetzte Beschleunigungssensor befriedigende Genauigkeiten erreicht. Die Ergebnisse des Radarmessverfahrens, was durch ein Gerät vertreten war, können hingegen nur als ausreichend bezeichnet werden. Die Fahrradcomputer weisen gute bis sehr gute Genauigkeiten auf, sind den Sportuhren aber nicht in allen Fällen überlegen.

Durch die neuste Generation von Chipsätzen, die eine sehr hohe Empfindlichkeit besitzen, ist der Empfang von GPS-Signalen auch bei eingeschränkten Sichten und geringfügigeren Abschattungen möglich. Allerdings treten vor allen Dingen in Häuserschluchten und natürlich innerhalb von Gebäuden Schwierigkeiten auf. Diese können letztendlich so weit gehen, dass eine Messung unmöglich wird.

Abschattungen sind für Beschleunigungssensoren unproblematisch, was auch den Einsatz in Häuserschluchten oder innerhalb von Gebäuden (z.B. Sporthallen) ermöglicht. Während verschiedene Untergründe keinen Einfluss auf die Genauigkeit haben, sind

Laufstile und -Techniken hierfür hingegen entscheidend. Das Rückwärtslaufen erzeugt beispielsweise vollständig fehlerhafte Messwerte.

Das besagte Problem tritt bei Geräten mit Radarsensoren nicht auf. Allerdings haben hier wiederum unterschiedliche Untergründe einen sehr starken Einfluss auf die Genauigkeit. Von Bedeutung sind außerdem die gewählten Laufstile und –Techniken sowie die Lebendigkeit der gewählten Umgebung.

Bei den Höhenmessungen entstehen meist nur bei der Bestimmung von absoluten Höhen Schwierigkeiten, was vor allem die per GPS ermittelten recht unischeren Werte betrifft. Barometrische Höhenmesser liefern relative Höhen, die sehr hohe Genauigkeiten aufweisen. Für die Messung absoluter Höhen, müssen diese allerdings zuvor auf einer bekannten Referenzhöhe geeicht worden sein.

Für Trainings in freier Umgebung oder in Parks und helleren Waldstücken eignen sich also insgesamt die GPS-basierten Messverfahren am besten, wobei die Kombination mit einem barometrischen Höhenmesser nicht notwendig, aber dennoch empfehlenswert ist. Zwischen hohen Bauwerken oder innerhalb von Gebäuden ist unter Umständen der Einsatz eines Beschleunigungssensors sinnvoller. Radarsensoren stellen in der Form keine ernst zu nehmende Alternative dar.

5.2 Ausblick

Um der immer größer werdenden Nachfrage an Sportuhren mit Entfernungs-, Geschwindigkeits- und Höhenmessung gerecht zu werden, entwickeln die Hersteller immer unterschiedlichere Messverfahren oder arbeiten an Weiterentwicklungen der bestehenden Methoden.

Für die GPS-basierten Verfahren sind immer kleiner werdende GPS-Antennen und Chipsätze zu erwarten. Die Empfangsempfindlichkeit dieser elektronischen Bauteile wird steigen und damit die Einsatzmöglichkeiten der Geräte, die diese Methode nutzen, erweitern. Durch den Start des Satellitensystems Galileo werden größere Redundanzen vorliegen, so dass einerseits ein schnelleres Lösen der Mehrdeutigkeiten und andererseits eine Steigerung der Genauigkeit zu erwarten ist. Korrekturdaten werden in Zukunft immer häufiger zum Einsatz kommen, was ebenfalls Genauigkeitssteigerungen zur Folge haben wird. Aber auch optimierte Softwareentwicklungen sind zu erwarten, die besser erprobte Filter bieten werden. Gleiches ist auch im Bezug auf Beschleunigungs- und Radarsensoren der Fall.

Bei den Geräten ist mit einer immer größer werdenden Zahl an Funktionen zu rechnen, wobei bei höheren Genauigkeiten auch eine Vergrößerung des Auflösungsvermögens der Messwerte und der Aufzeichnungsmöglichkeiten und –Intervalle zu erwarten ist.

Literaturverzeichnis

Alles über Radar, Laser, [...]. (2006). Abgerufen am 12. Mai 2007 von Blitzberlin: http://www.blitzberlin.de/

Bedienungsanleitung Kabelloser Fahrradcomputer GT 7316. (2004). Abgerufen am 11. Mai 2007 von Medion: http://download3.medion.de/downloads/anleitungen/gt7316.pdf

Benninghoff, A., & Goerttler, K. (1978). *Lehrbuch der Anatomie des Menschen* (12. Ausg., Bd. I). München: Urban & Schwarzenberg.

Best, S. (2005). RDS: Der Rolls Royce unter den Speedometern. *elektronik industrie , 10*, 93.

Dynastream Innovations Inc. *SpeedMax White Paper.* Abgerufen am 2. August 2007 von Dynastream: http://www.dynastream.com

Engels, D. W. (1978). *Alexander the Great and the Logistics of the Macedonian Army.* Los Angeles: University of California Press.

ESA. (2007). *EGNOS for Professionals*. Abgerufen am 14. 09 2007 von http://www.egnos-pro.esa.int/index.html

Funktionsprinzip RSS. Abgerufen am 12. Mai 2007 von Sonic Instruments: http://www.sonicinstruments.com/

Kahmen, H. (1997). *Vermessungskunde* (19 Ausg.). Berlin: De Gruyter.

kowoma. *Wie funktioniert GPS. Alles Wissenswerte.* Abgerufen am 03. 07 2007 von http://www.kowoma.de/gps/index.htm

Lohmann, P. (2007). *Vorlesungsskript "Fernerkundung".* Hannover: Institut für Photogrammetrie und Geoinformation.

Niemeier, W. (2002). *Ausgleichungsrechnung.* Berlin: De Gruyter.

Nike + iPod Frequently Asked Questions (Technical). (19. Juni 2007). Abgerufen am 27. August 2007 von Nike + iPod: http://docs.info.apple.com/article.html?artnum=303934#faq1

Rose, J., & Gamble, J. G. (1994). *Human Walking.* US: Lippincott Williams & Wilkins.

Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy (2nd edition).* Berlin: De Gruyter.

Sörgel, U. (2006). *Vorlesungsskript Radarfernerkundung.* Hannover: Institut für Photogrammetrie und Geoinformation.

Stirling, R. G. (2004). *Development of a Pedestrian Navigation System Using Shoe Mounted Sensors (Masterarbeit).* Edmonton, Alberta.

Stirling, R., Fyfe, K., & Lachapelle, G. (2005). Evaluation of a New Method of Heading Estimation for Pedestrian Dead Reckoning Using Shoe Mounted Sensors. *Journal of Navigation (Vol. 58)* , S. 31-45.

Timmen, L. (2006). *Vorlesungsskript "Gravimetrie".* Hannover: Institut Für Erdmessung.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2006). *Physik - Für Wissenschaftler und Ingenieure* (2. Ausg.). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Torge, W. (2003). *Geodäsie* (2 Ausg.). Berlin: De Gruyter.

Wikipedia "Fahrradcomputer". (6. August 2007). Abgerufen am 10. August 2007 von Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/Fahrradcomputer

Wikipedia "Radar". (10. Mai 2007). Abgerufen am 12. Mai 2007 von Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/Radar

Wolff, C. (2007). *Radargrundlagen*. Abgerufen am 12. Mai 2007 von Radar-Tutorial: http://www.radartutorial.eu/

Anhang

Teststrecke 1.0

Test:		optimale Bedingungen						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke [m]	Zeit Hinweg [s]	Zeit Rückweg [s]	Dateiname	Bemerkung
1	Casio	520	500	500	197,55	186,68	keine Daten	
2	Casio	500	550	500	193,45	195,90	keine Daten	
3	Casio	530	510	500	193,95	201,93	keine Daten	Hinweg später durchgeführt
4	Edge	504	498	500	200	201	edge01(.txt|.gdb|.kml)/edge02(.txt|.gdb|.kml)	
5	Edge	499	502	500	200	208	edge03(.txt|.gdb|.kml)/edge04(.txt|.gdb|.kml)	
6	FRWD	500	500	500	207	207	frwd01(.txt|.kml)/frwd02(.txt|.kml)	
7	FRWD	500	480	500	199	194	frwd03(.txt|.kml)/frwd04(.txt|.kml)	
8	HAC	530	520	500	195,19	193,71	hac01.txt/hac02.txt	
9	HAC	510	520	500	193,95	194,78	hac03.txt/hac04.txt	
10	Polar	490	480	500	195,30	196,80	polar01.txt/polar02.txt	
11	Polar	490	490	500	191,70	194,10	polar03.txt/polar04.txt	
12	Forerunner	508	502	500	194,88	191,54	fore01(.txt|.gdb|.kml)/fore02(.txt|.gdb|.kml)	
13	Forerunner	508	505	500	186,69	191,77	fore03(.txt|.gdb|.kml)/fore04(.txt|.gdb|.kml)	
14	Edge	503	498	500	110	85	edge_fahrrad_01(.txt|.gdb|.kml)/edge_fahrrad_02(.txt|.gdb|.kml)	mit Fahrrad
15	Edge	495	497	500	108	83	edge_fahrrad_03(.txt|.gdb|.kml)/edge_fahrrad_04(.txt|.gdb|.kml)	mit Fahrrad
16	HAC	480	490	500	108,87	88,75	hac_fahrrad_01.txt/hac_fahrrad_02.txt	mit Fahrrad ohne Radar
17	HAC	490	490	500	115,63	97,53	hac_fahrrad_03.txt/hac_fahrrad_04.txt	mit Fahrrad ohne Radar

Teststrecke 2.0

Test:		eingeschränkte Sicht (durch Gebäude, Expo-Plaza)				
Nr:	Gerät:	Strecke [m]	Sollstrecke [m]	Zeit [s]	Dateiname	Bemerkung
1	FRWD	890	824,3	312	frwd01(.txt|.kml)	
2	FRWD	910	824,3	294	frwd02(.txt|.kml)	2 x Signal schwach
3	FRWD	860	824,3	290	frwd03(.txt|.kml)	
4	FRWD	860	824,3	290	frwd04(.txt|.kml)	1 x Signal schwach
5	Casio	830	824,3	359,34	keine Daten	1 x Signal schwach
6	Casio	880	824,3	292,58	keine Daten	1 x Signal schwach
7	Casio	870	824,3	287,81	keine Daten	
8	Casio	930	824,3	288,57	keine Daten	2 x Signal schwach
9	Forerunner	818	824,3	341,77	fore01(.gdb|.txt)	
10	Forerunner	843	824,3	349,99	fore02(.gdb|.txt)	
11	Forerunner	828	824,3	320,39	fore03(.gdb|.txt)	
12	Forerunner	852	824,3	280,62	fore04(.gdb|.txt)	
13	Forerunner	840	824,3	283,89	fore05(.gdb|.txt)	
14	Edge	815	824,3	342	edge01(.gdb|.txt)	
15	Edge	821	824,3	319	edge02(.gdb|.txt)	
16	Edge	814	824,3	280	edge03(.gdb|.txt)	

Teststrecke 2.1

Test:		eingeschränkte Sicht (durch Bäume, Georgengarten)						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke [m]	Zeit Hinweg [s]	Zeit Rückweg [s]	Dateiname	Bemerkung
1	Forerunner	971	1000	1000	370,75	391,59	forerunner_01(.txt|.gdb|.kml) / forerunner_02(.txt|.gdb|.kml)	
2	Forerunner	974	1010	1000	390,12	393,26	forerunner_03(.txt|.gdb|.kml) / forerunner_04(.txt|.gdb|.kml)	
3	HAC	990	970	1000	231,00	186,00	hac_01.txt / hac_02.txt	Fahrrad, ohne Kalibrierung
4	Edge	998	1000	1000	231,00	186,00	edge_fahrrad_01(.txt|.kml|.gdb) / edge_fahrrad_02(.txt|.kml|.gdb)	Fahrrad
5	Casio	1070	1350	1000	386,54	395,16	keine Daten	Rückweg Signal schlecht
6	HAC	980		1000	213,00		hac_03.txt	Fahrrad, ohne Kalibrierung
7	Edge	994		1000	213,00		edge_fahrrad_03(.txt|.kml|.gdb)	Fahrrad
8	Casio	1030	1000	1000	390,16	440,19	keine Daten	
9	Edge	1560		1555	277,00		edge_fahrrad_04(.txt|.kml|.gdb)	Fahrrad
10	Polar	990	970	1000	392,60	407,10	polar_01.txt / polar_02.txt	Kalibriert auf 1555 m Basis
11	Polar	990	990	1000	396,10	405,20	polar_03.txt / polar_04.txt	
12	HAC	1000		1000	210,00		hac_04.txt	Fahrrad, ohne Kalibrierung
13	HAC	1030		1000	210,00		keine Daten	Radar einzeln (Fahrrad)
14	FRWD	1070	1010	1000	406,00	407,00	frwd_01(.txt|.kml) / frwd_02(.txt|.kml)	
15	Forerunner	1010	990	1000	187,42	204,92	forerunner_fahrrad_05(.txt|.gdb|.kml) / forerunner_fahrrad_06(.txt|.gdb|.kml)	Fahrrad
16	FRWD	1030	1070	1000	416,00	426,00	frwd_03(.txt|.kml) / frwd_04(.txt|.kml)	
17	HAC	990	1020	1000	421,00	442,00	keine Daten	Radar einzeln
18	Edge	1000	1000	1000	421,00	442,00	edge_05(.txt|.kml|.gdb) / edge_06(.txt|.kml|.gdb)	
19	Forerunner	990		1000	233,00		forerunner_fahrrad_07(.txt|.gdb|.kml)	unter dichten Bäumen (Allee)
20	HAC	1000	990	1000	432,00	449,00	keine Daten	Radar einzeln
21	Edge	997	1010	1000	432,00	449,00	edge_07(.txt|.kml|.gdb) / edge_08(.txt|.kml|.gdb)	

Teststrecke 3.0								
Test:		stark eingeschränkte Sicht nach oben --> Wald						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke [m]	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Dateiname	Bemerkung
1	Edge	494	476	500	132	125	edge_fahrrad_01(.txt|.gdb)/edge_fahrrad_02(.txt|.gdb)	mit Fahrrad
2	Edge	491	491	500	131	130	edge_fahrrad_03(.txt|.gdb)/edge_fahrrad_04(.txt|.gdb)	mit Fahrrad
3	FRWD	500	500	500	171	237	frwd01(.txt|.kml)/frwd02(.txt|.kml)	
4	FRWD	500	390	500	270	288	frwd03(.txt|.kml)/frwd04(.txt|.kml)	kaum Signal auf Rückweg
5	Forerunner	478	469	500	270,51	286,25	fore01(.txt|.gdb|.kml)/fore02(.txt|.gdb|.kml)	
6	Forerunner	484	464	500	276,69	274,36	fore03(.txt|.gdb|.kml)/fore04(.txt|.gdb|.kml)	
7	Edge	495	451	500	276	274	edge01(.txt|.gdb)/edge02(.txt|.gdb)	
8	Edge	503	503	500	270	261	edge03(.txt|.gdb)/edge04(.txt|.gdb)	
9	Casio	490	480	500	271,12	262,79	keine Daten	Rückweg Signal schwach
10	Casio	470	490	500	273,16	269,18	keine Daten	

Teststrecke 4.1								
Gerät		Höhe unten Punkt 4015 137,618	Höhe oben Punkt 4013 150,029	ΔH [m]	Strecke [m] 159,3 m	Laufzeit [s]	Dateiname	Bemerkung
Edge	Hinweg 1	91	105	14	265	2:43	edge01 (.txt, .gdb, .kml)	
	Rückweg 1	90	103	13	263	2:42	edge02 (.txt, .gdb, .kml)	
Edge	Hinweg 2	90	105	15	260	2:43	edge03 (.txt, .gdb, .kml)	
	Rückweg 2	91	103	12	263	2:39	edge04 (.txt, .gdb, .kml)	
Forerunner	Hinweg 1	95	108	13	260	3:18	fore01 (.txt, .gdb, .kml)	
	Rückweg 1	99	108	9	255	2:28	fore02 (.txt, .gdb, .kml)	
Forerunner	Hinweg 2	96	108	12	260	2:32	fore03 (.txt, .gdb, .kml)	
	Rückweg 2	93	105	12	259	2:25	fore04(.txt, .gdb, .kml)	
FRWD	Hinweg 1	87	97	10	250	2:46	frwd01 (.txt, .kml)	
	Rückweg 1	94	97	3	260	2:46	frwd02 (.txt, .kml)	
FRWD	Hinweg 2	99	99	0	260	2:49	frwd03 (.txt, .kml)	
	Rückweg 2	96	101	5	260	2:46	frwd04 (.txt, .kml)	
HAC	Hinweg 1	134	146	12	200	3:18	hac01.txt	
	Rückweg 1	131	145	14	280	2:28	hac02.txt	
HAC	Hinweg 2	132	145	13	270	2:32	hac03.txt	
	Rückweg 2	133	144	11	270	2:25	hac04.txt	
Polar	Hinweg 1	98	110	12	270	2:56	polar01.txt	
	Rückweg 1	97	110	13	290	2:47	polar02.txt	
Polar	Hinweg 2	97	107	10	260	2:38	polar03.txt	
	Rückweg 2	96	108	12	260	2:30	polar04.txt	

Teststrecke 5.0

Test:		bewegte Umgebung (Maschsee - Ostufer)								
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	RDS Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	RDS Rückweg [m]	Sollstrecke [m]	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Dateiname	Bemerkung
1	HAC	0	450	460	460	400	118,05	119,21	hac01.txt/hac02.txt	
2	HAC	430	430	420	420	400	117,28	106,01	hac03.txt/hac04.txt	
3	HAC	450	450			400	118,11		hac05.txt	Ersatz für H1 (5.Datei)

Teststrecke 6.0

Test:		weicher Untergrund (Rasen)						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke [m]	Zeit Hinweg [s]	Zeit Rückweg [s]	Dateiname	Bemerkung
1	HAC	530	530	500	173,81	184,95	hac01.txt / hac02.txt	RDS Hinweg 540 / RDS Rückweg 540
2	HAC	530	520	500	184,15	184,7	hac03.txt / hac04.txt	RDS Hinweg 530 / RDS Rückweg 530
3	Polar	510	490	500	178,4	188,5	polar01.txt / polar02.txt	
4	Polar	500	500	500	179,8	165,4	polar03.txt / polar04.txt	

Teststrecke 7.0								
Test:		mittlerer Untergrund (Schotter, Feldweg)						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke [m]	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Dateiname	Bemerkung
1	HAC	460	460	500	225,37	215,76	hac01.txt / hac02.txt	RDS Hinweg 470 / RDS Rückweg 460
2	HAC	490	510	500	168,47	173,95	hac03.txt / hac04.txt	RDS Hinweg 490 / RDS Rückweg 510
3	Polar	490	480	500	187,80	185,70	polar01.txt / polar02.txt	
4	Polar	490	490	500	187,40	189,70	polar03.txt / polar04.txt	

Teststrecke 8.0								
Test:		Kurvige Strecke						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke [m]	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Dateiname	Bemerkung
1	Forerunner	1080	1080	1081,8	431,97	420,74	fore01(.gdb|.txt) / fore02(.gdb|.txt)	
2	Forerunner	1070	1080	1081,8	504,64	476,96	fore03(.gdb|.txt) / fore04(.gdb|.txt)	
3	Edge	1070	1060	1081,8	428	405	edge01(.gdb|.txt) / edge02(.gdb|.txt)	
4	Edge	1090	1080	1081,8	447	448	edge03(.gdb|.txt) / edge04(.gdb|.txt)	
5	Casio	1480	1260	1081,8	418,2	390,82	keine Daten	
6	Casio	1100	1060	1081,8	390,84	388,46	keine Daten	
7	Polar	1100	1120	1081,8	382,2	384,5	polar01.txt / polar02.txt	neu kalibriert auf 500m Basis
8	Polar	1120	1110	1081,8	387,7	403,2	polar03.txt / polar04.txt	
9	HAC	1050	1040	1081,8	394,88	409,63	hac01.txt / hac.02.txt	RDS Hinweg 1080 / RDS Rückweg 1060
10	HAC	1040	1000	1081,8	414,44	428,4	hac03.txt / hac04.txt	RDS Hinweg 1060 / RDS Rückweg 1010
11	FRWD	1000	1100	1081,8	407	429	frwd01(.txt|.kml) / frwd02(.txt|.kml)	
12	FRWD	1100	1080	1081,8	417	430	frwd03(.txt|.kml) / frwd04(.txt|.kml)	
13	Edge	1060	1060	1081,8	437	436	edge_fahrrad_01(.gdb|.txt) / edge_fahrrad_02(.gdb|.txt)	mit Fahrrad
14	Edge	1080	1070	1081,8	274	308	edge_fahrrad_03(.gdb|.txt) / edge_fahrrad_04(.gdb|.txt)	mit Fahrrad
15	HAC	1060	1060	1081,8	373	362,17	hac_fahrrad_01.txt / hac_fahrrad_02.txt	mit Fahrrad
16	HAC	1070	1080	1081,8	279,49	310,64	hac_fahrrad_03.txt / hac_fahrrad_04.txt	mit Fahrrad
17	Edge	1080		1081,8	394		edge05(.gdb|.txt)	nachträglicher Lauf

Teststrecke 9.0

Test:		Anhalten in Tunnelmitte (mit 30 Sekunden warten)					
Nr:	Gerät:	Strecke [m]	Strecke nach 30s [m]	Sollstrecke	Zeit	Dateiname	Bemerkung
1	Forerunner	180	175	166,9	84,97	fore01(.gdb|.txt)	
2	Forerunner	186	193	166,9	84,51	fore02(.gdb|.txt)	
3	Forerunner	184	197	166,9	88,15	fore03(.gdb|.txt)	
4	Forerunner	176	170	166,9	89,64	fore04(.gdb|.txt)	
5	Edge		182	166,9	87	edge01(.gdb|.txt)	
6	Edge	166	173	166,9	84	edge02(.gdb|.txt)	
7	Edge	172	178	166,9	81	edge03(.gdb|.txt)	
8	Edge	169	179	166,9	80	edge04(.gdb|.txt)	
9	Casio	140	150	166,9	81,8	keine Daten	Signal schwach
10	Casio	160	180	166,9	81,34	keine Daten	Signal schwach
11	Casio	170	170	166,9	81,31	keine Daten	Signal schwach
12	Casio	160	170	166,9	81,52	keine Daten	Signal schwach
13	FRWD	170	190	166,9	89	keine Daten	
14	FRWD	170	210	166,9	82	keine Daten	
15	FRWD	160	180	166,9	83	keine Daten	
16	FRWD	160	180	166,9	83	keine Daten	
17	FRWD	160	180	166,9	80	keine Daten	
18	FRWD	170	180	166,9	83	keine Daten	
19	FRWD	160	180	166,9	83	keine Daten	
20	FRWD	160	150	166,9	84	keine Daten	
21	FRWD	160	180	166,9	90	keine Daten	

Teststrecke 9.0

Test:		Tunneldurchlauf						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Dateiname	Bemerkung
1	Edge	310	304	317	107	113	edge01(.gdb|.txt) / edge02(.gdb|.txt)	
2	Edge	305	313	317	109	113	edge03(.gdb|.txt) / edge04(.gdb|.txt)	
3	FRWD	300	350	317	111	114	frwd01(.txt|.kml) / frwd02(.txt|.kml)	
4	FRWD	320	340	317	111	115	frwd03(.txt|.kml) / frwd04(.txt|.kml)	Hinweg 2 x / Rückweg 2 x Signal schwach
5	Casio	310	350	317	100,97	106,91	keine Daten	
6	Casio	320	320	317	97,18	96,71	keine Daten	
7	Forerunner	309	314	317	100,97	106,19	fore01(.gdb|.txt) / fore02(.gdb|.txt)	
8	Forerunner	311	313	317	96,36	95,54	fore01(.gdb|.txt) / fore02(.gdb|.txt)	
9	Edge	311	308	317	61	60	edge_fahrrad_01(.gdb|.txt) / edge_fahrrad_02(.gdb|.txt)	mit Fahrrad
10	Edge	310	318	317	58	59	edge_fahrrad_03(.gdb|.txt) / edge_fahrrad_04(.gdb|.txt)	mit Fahrrad

Teststrecke 9.1

Test:		Anhalten in Tunnelmitte (mit 30 Sekunden warten)					
Nr:	Gerät:	Strecke [m]	Strecke nach 30s [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg	Dateiname	Bemerkung
1	Edge	134	150	142	77	edge01(.gdb|.txt)	Signal schwach
2	Edge	139	203	142	74	edge02(.gdb|.txt)	nach 20s Signal schwach
3	Edge	138	162	142	76	edge03(.gdb|.txt)	nach 30s Signal schwach
4	Edge	131	128	142	75	edge04(.gdb|.txt)	
5	Forerunner	138	142	142	77,19	fore01(.gdb|.txt)	
6	Forerunner	143	160	142	71,11	fore02(.gdb|.txt)	
7	Forerunner	142	164	142	73,42	fore03(.gdb|.txt)	
8	Forerunner	142	153	142	73,19	fore04(.gdb|.txt)	
9	FRWD	140	190	142	75	keine Daten	
10	FRWD	130	150	142	70	keine Daten	
11	FRWD	140	150	142	70	keine Daten	
12	FRWD	140	170	142	67	keine Daten	
13	FRWD			142		frwd05(.txt|.kml)	nachträglich - Startpunkt markiert
14	FRWD			142		frwd06(.txt|.kml)	nachträglich - Startpunkt markiert
15	Casio	130	130	142	75	keine Daten	
16	Casio	120	120	142	76	keine Daten	Batterie leer
17	Casio	130	130	142	76	keine Daten	
18	Casio	130	130	142	73	keine Daten	

Teststrecke 9.1

Test:		Tunneldurchlauf						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Dateiname	Bemerkung
1	Edge	273	279	276,6	91	77	edge01(.gdb|.txt) / edge02(.gdb|.txt)	
2	Edge	273	277	276,6	77	82	edge03(.gdb|.txt) / edge04(.gdb|.txt)	
3	Forerunner	281	273	276,6	91,09	77,83	fore01(.gdb|.txt) / fore02(.gdb|.txt)	
4	Forerunner	279	271	276,6	78,06	82,49	fore03(.gdb|.txt) / fore04(.gdb|.txt)	
5	Casio	280	270	276,6	89,9	89,52	keine Daten	im Tunnel Signal schwach
6	Casio	270	270	276,6	82,12	82,34	keine Daten	im Tunnel Signal schwach
7	FRWD	290	290	276,6	81	88	keine Daten	
8	FRWD	290	270	276,6	81	81	keine Daten	
9	FRWD	270	270	276,6	91	84	keine Daten / frwd05(.txt|.kml)	
10	FRWD	280	290	276,6	90	86	frwd06(.txt|.kml) / frwd07(.txt|.kml)	verlängerte Aufnahme mit Markierungen
11	FRWD	280	280	276,6	89	88	frwd08(.txt|.kml) / frwd09(.txt|.kml)	verlängert von Startpunkt aus
12	Edge	275	271	276,6	56	55	edge_fahrrad_01(.gdb|.txt) / edge_fahrrad_02(.gdb|.txt)	mit Fahrrad
13	Edge	272	275	276,6	52	54	edge_fahrrad_03(.gdb|.txt) / edge_fahrrad_04(.gdb|.txt)	mit Fahrrad
14				276,6				

Teststrecke 10.0									
Test:		Anderer Trage-/Anbringungsort							
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Anbringungsort	Dateiname	Bemerkung
1	Polar	140	120	159,4	51,6	55,3	Schuh oben (eher senkrecht)	polar01.txt / polar02.txt	
2	Polar	130	120	159,4	45,1	45,6	Schuh oben (eher senkrecht)	polar03.txt / polar04.txt	

Teststrecke 10.0									
Test:		Kein Abrollen, laufen auf Zehenspitzen							
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Anbringungsort	Dateiname	Bemerkung
1	Polar	150	160	159,4	46,4	47,1	normal / Fuss	polar01.txt / polar02.txt	
2	Polar	140	150	159,4	41,9	44,5	normal / Fuss	polar03.txt / polar04.txt	

Teststrecke 10.0									
Test:		Ausrichtung Gerät schräg/seitlich (Radar)							
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Anbringungsort	Dateiname	Bemerkung
1	HAC	0	80	159,4	51,72	49,64	seitlich 90°	keine Daten / keine Daten	RDS Hinweg 40 / RDS Rückweg 70
2	HAC	100	20	159,4	49,93	50,64	seitlich 90°	keine Daten / keine Daten	RDS Hinweg 110 / RDS Rückweg 40
3	HAC	0	30	159,4	56,26	49,78	seitlich 90°	hac01.txt/hac02.txt	RDS Hinweg 20 / RDS Rückweg 40
4	HAC	20	20	159,4	48,45	48,78	seitlich 90°	hac02.txt/hac03.txt	RDS Hinweg 20 / RDS Rückweg 10
5	HAC	20	0	159,4	50,44	46,46	seitlich 90°	hac04.txt/hac05.txt	RDS Hinweg 30 / RDS Rückweg 10
6	HAC	10		159,4	50,34		seitlich 90°	hac06.txt/hac07.txt	RDS Hinweg 20

Teststrecke 10.0									
Test:		Ausrichtung Gerät nach hinten (Radar)							
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Anbringungsort	Dateiname	Bemerkung
1	HAC	110	170	159,4	49,41	49,1	hinten 180°	keine Daten / keine Daten	RDS Hinweg 180 / RDS Rückweg 180
2	HAC	60	170	159,4	47,03	49,97	hinten 180°	keine Daten / keine Daten	RDS Hinweg 170 / RDS Rückweg 180
3	HAC	110	100	159,4	48,28	48,14	hinten 180°	hac01.txt/hac02.txt	RDS Hinweg 120 / RDS Rückweg 100
4	HAC	100	10	159,4	47,19	55,3	hinten 180°	hac03.txt/hac04.txt	RDS Hinweg 90 / RDS Rückweg 20
5	HAC	30	160	159,4	48,66	47,58	hinten 180°	hac05.txt/hac06.txt	RDS Hinweg 50 / RDS Rückweg 180

Teststrecke 10.0								
Test:		Lauftechnik: springen (schnell, weniger abrollend)						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg [s]	Zeit Rückweg [s]	Dateiname	Bemerkung
1	Polar	130	150	159,4	47,7	51,7	polar01.txt / polar02.txt	
2	Polar	140	160	159,4	55,9	51,4	polar03.txt / polar04.txt	
3	HAC	160	110	159,4	43,02	50,66	keine Daten / hac02.txt	RDS Hinweg 170 / RDS Rückweg 110
4	HAC	160	160	159,4	49,75	51,1	hac03.txt / hac04.txt	RDS Hinweg 160 / RDS Rückweg 160
5	HAC	150	70	159,4	48,27	46,96	hac05.txt / hac06.txt	RDS Hinweg 170 / RDS Rückweg 70

Teststrecke 10.0								
Test:		Gehen						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Dateiname	Bemerkung
1	Polar	150	140	159,4	94,5	90,5	polar01.txt / polar02.txt	
2	Polar	140	140	159,4	89,2	90,8	polar03.txt / polar04.txt	
3	HAC	140	150	159,4	111,05	114,15	hac01.txt / hac02.txt	RDS Hinweg 150 / RDS Rückweg 140
4	HAC	150	150	159,4	113,94	116,21	hac03.txt / hac04.txt	RDS Hinweg 160 / RDS Rückweg 150

Teststrecke 10.0								
Test:		vorwärts laufend, kleine Schritte (kurze Schrittweite)						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Dateiname	Bemerkung
1	Polar	140	140	159,4	54,9	54,5	polar01.txt / polar02.txt	
2	Polar	140	140	159,4	57,3	56,1	polar03.txt / polar04.txt	
3	HAC	150	160	159,4	58,6	62,73	keine Daten / keine Daten	RDS Hinweg 160 / RDS Rückweg 170
4	HAC	150	160	159,4	59	67,16	keine Daten / keine Daten	RDS Hinweg 160 / RDS Rückweg 160
5	HAC	160	150	159,4	80,52	67,37	hac01.txt / hac02.txt	RDS Hinweg 160 / RDS Rückweg 160
6	HAC	130	150	159,4	68,97	78,17	hac03.txt / hac04.txt	RDS Hinweg 150 / RDS Rückweg 160

Teststrecke 10.0								
Test:		vorwärts laufend, große Schritte (große Schrittweite)						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Dateiname	Bemerkung
1	Polar	140	140	159,4	45,9	46,8	polar01.txt / polar02.txt	
2	Polar	120	150	159,4	39,5	43	polar03.txt / polar04.txt	
3	HAC	10	20	159,4	39,42	50,67	hac01.txt / hac02.txt	RDS Hinweg 10 / RDS Rückweg 20
4	HAC	90	160	159,4	45,47	43,07	hac03.txt / hac04.txt	RDS Hinweg 90 / RDS Rückweg 170

Teststrecke 10.0								
Test:		rückwärts laufend						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg [s]	Zeit Rückweg [s]	Dateiname	Bemerkung
1	Polar	0		159,4	70		polar01.txt	
2	HAC	160	140	159,4	108,21	116,87	hac01.txt /hac02.txt	RDS Hinweg 170 / RDS Rückweg 150
3	HAC	150	140	159,4	66,56	67,17	hac03.txt/hac04.txt	RDS Hinweg 150 / RDS Rückweg 140
4	HAC	100	130	159,4	65,22	72,07	hac05.txt/hac06.txt	RDS Hinweg 110 / RDS Hinweg 150
5	Polar	10	100	159,4	83,5	62,5	polar02.txt/polar03.txt	
6	Polar	40	220	159,4	70,5	108,8	polar04.txt/polar05.txt	

Teststrecke 10.0								
Test:		Lauftechnik: Walken (komplett abrollend)						
Nr:	Gerät:	Strecke Hinweg [m]	Strecke Rückweg [m]	Sollstrecke	Zeit Hinweg	Zeit Rückweg	Dateiname	Bemerkung
1	Polar	140	130	159,4	72	66	polar01.txt / polar02.txt	
2	HAC	170	140	159,4	75,54	76,69	hac01.txt / hac02.txt	RDS Hinweg 170 / RDS Rückweg 150
3	HAC	140	150	159,4	76,71	77,71	hac03.txt / hac04.txt	RDS Hinweg 150 / RDS Rückweg 160
4	Polar	130	140	159,4	71,1	72,4	polar01.txt / polar02.txt	

Testhaus MZ							
Etage:	-2	Erdgeschoss	4	8	12	16	18
Punkt-Nr.:	180	200	240	280	320	360	380
Sollhöhe [m]:	48	55	70	84	97	111	118
Gerät:							
Polar	51	58	73	85	98	111	119
HAC	48	55	72	83	96	109	116
Edge	50	57	71	84	98	111	117
FRWD	keine Höhe ohne GPS, trotz Barometer						
Forerunner	keine Höhe ohne GPS						

Messdachpfeiler		
Initialisierungszeiten		
Gerät	Zeit [s]	
Forerunner	63,61	
Edge	42,16	
FRWD	43,54	
Foretrex 201	45,20	
etrex Vista	104,00	
Messdaten		
Gerät	Pfeiler-Nr.	Dateiname
Forerunner	2	fore01(.gdb|.txt)
Edge	5	edge01(.gdb|.txt)
FRWD	4	frwd01(.txt|.kml)
Foretrex 201	3	fore01(.gdb|.txt)
etrex Vista	6	etrex01(.gdb|.txt)